

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Felippe Kalil Mendonça

**EVOLUÇÃO DA TÉCNICA DE SEGUIMENTO DE JUNTA VIA
SENSORIAMENTO DO ARCO PARA OPERAÇÕES DE
SOLDAGEM EM POSIÇÕES FORÇADAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra.
Coorientador: Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Mendonca, Felipe Kalil

**Evolução da técnica de seguimento de junta via
sensoriamento do arco para operações de soldagem em posições
forçadas / Felipe Kalil Mendonca ; orientador, Jair
Carlos Dutra ; co-orientador, Régis Henrique Gonçalves e
Silva. - Florianópolis, SC, 2013.**

125 p.

**Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.**

Inclui referências

**1. Engenharia Mecânica. 2. Automatização da soldagem. 3.
Seguimento de junta. 4. Indústria naval. 5. MIG/MAG . I.
Dutra, Jair Carlos. II. Silva, Régis Henrique Gonçalves e.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.**

Felippe Kalil Mendonça

**EVOLUÇÃO DA TÉCNICA DE SEGUIMENTO DE JUNTA VIA
SENSORIAMENTO DO ARCO PARA OPERAÇÕES DE
SOLDAGEM EM POSIÇÕES FORÇADAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de maio de 2013.

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.
Instituto Federal de Educação Tecnológica

Raul Gohr Jr., Dr. Eng.
IMC Soldagem

Este trabalho é especialmente dedicado aos meus pais Maristela e Rogério, ao meu irmão Arthur, e à minha namorada Stéfanie.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente à conclusão deste trabalho, dentre esses:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pelas orientações e oportunidade de fazer parte da equipe LABSOLDA;
- Ao Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, pela atenção prestada e conhecimentos transmitidos;
- Ao Prof. Nelso Gauze Bonacorso, pelo modelo de dedicação e vocação ao trabalho científico-tecnológico, demonstrados desde minha graduação;
- Ao Eng. Raul Gohr Jr., pelas dúvidas solucionadas e conhecimentos transmitidos;
- Ao Tecnólogo Ricardo Campagnin, pela amizade e conhecimentos transmitidos;
- Aos Tecnólogos Miguel Mannes Hillesheim e Fernando Costenaro Silva, pela amizade e suporte em programação;
- Ao Tecnólogo Cleber Marques, pela amizade e suporte relacionado ao *Software Microsoft Excel*;
- Ao soldador Cleber Guedes, pela amizade e pelos conhecimentos transmitidos;
- Aos membros e ex-membros do LABSOLDA, Alexandre Blum Weingartner, Bruna Martinello Savi, Denílson Rogério Beiler, Diego Erdmann dos Santos, Everton Werlang, Erwin Werner Teichmann, Ezequiel Gonçalves, Fábio Renato Michelin, Hellinton Direne Filho, Ivan Olszanski Pigozzo, João Facco de Andrade, Jônathas Alexandre Alves, Luiz Fernando Suliman, Marcelo Pompermaier Okuyama, Márcia Paula Thiel, Marcus Barnetche, Mateus Barancelli Schwedersky, Miguel Guayasamin, Paulo Roberto Pereira, Pedro Bruciapaglia, Rafael Polezi Lucas, Ramon Natal Meller, Reinaldo Fayal, Renan Kindermann, entre outros, pela amizade, companheirismo e apoio;
- À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;
- À ANP/PETROBRAS e SPS, pelo apoio e concessão de bolsas;
- À minha família, pelo apoio e confiança incondicionais.

“Todo o nosso conhecimento se inicia com sentimentos”.

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

A indústria naval brasileira opera em seu limite de capacidade, a fim de atender suas demandas atuais - como o caso da encomenda de 730 estruturas navais realizada pela PETROBRAS. Isto é devido, principalmente, à capacidade produtiva dos nossos estaleiros, que, mesmo com a atual expansão, ainda é muito baixa quando comparada à dos estaleiros asiáticos e europeus. A automatização dos processos de fabricação envolvidos na construção de embarcações é uma forma de aumentar a produtividade do setor naval brasileiro e torná-lo mais competitivo.

Neste contexto, este trabalho aborda o desenvolvimento de uma técnica relacionada à automatização da soldagem de juntas pelo processo MIG/MAG convencional. Esta técnica é conhecida como seguimento de junta e tornou possível o controle da trajetória da tocha de maneira eficaz e eficiente utilizando-se o arco elétrico como sensor, em diferentes posições de soldagem. Para tanto, foram necessários os estabelecimentos de um algoritmo de seguimento de junta, de uma calibração e de uma funcionalidade de gravação e reprodução de trajetória média da tocha, para um sistema nacional de soldagem, TARTÍLOPE V2F.

No início deste trabalho, são abordadas as principais influências sobre a corrente elétrica na soldagem de juntas. Neste caso, foi mostrado que a velocidade com que o arame chega à poça de fusão - algo desprezado pela literatura especializada - é, no caso de arame de aço de 1,2 mm de diâmetro, a principal influência sobre a corrente, e assim, deve ser considerada no automatismo de seguimento de junta.

Além do mais, este trabalho descreve a utilização de uma solução de seguimento de junta da empresa MOTOMAN que se mostrou de complexa operacionalidade e, devido à escassez de informação presente em seu manual, tornou necessário o estabelecimento de procedimentos e estratégias para sua utilização de maneira eficiente.

Palavras-chave: Indústria naval. Nacional. Automatização da soldagem. Processos de fabricação. Seguimento de junta. MIG/MAG convencional. Sensoriamento a arco. TARTÍLOPE V2F. Soldagem fora de posição. Influências sobre o arco elétrico. MOTOMAN.

ABSTRACT

The Brazilian shipbuilding industry operates at its maximum capacity in order to meet their current demands - as the case of the 730 marine structures order held by PETROBRAS. This is mainly due to the Brazilian shipyards productive capacity, which even with the current expansion is still very low compared to the Asian and European shipyards. The automation of the manufacturing processes involved in ship construction is a way to increase the Brazilian shipbuilding sector productivity and make it more competitive.

In this context, this paper discusses the development of a technique related to joint welding automation using the GMAW process. This technique is known as joint tracking, and allowed the effective and efficient torch trajectory control using through-the-arc sensing, in different welding positions. To make this possible, was required the establishment of a joint tracking algorithm, a calibration and a functionality of recording and playback the torch medium trajectory, for a Brazilian welding system, TARTÍLOPE V2F.

At the beginning of this work, was addresses the principal influences on the current in the welding joints. In this case, it was shown that the speed at which the wire reaches the weld pool - something ignored by the literature - is, in the case of steel wire with 1.2 mm diameter, the main influence on the current, and thus, should be considered in automatic joint tracking.

Furthermore, this paper describes the use of a MOTOMAN joint tracking solution, that showed a complex operation and has necessitated the establishment of procedures and strategies to efficiently be used.

Key-words: Shipbuilding. Brazilian. Welding automation. Manufacturing processes. Joint tracking. GMAW. Through-the-arc sensing. TARTÍLOPE V2F. Out of position welding. Influences on the arc. MOTOMAN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de automatização da soldagem de embarcações [3].	21
Figura 2 - Exemplo da aplicação de robô antropomórfico (comumente utilizado na indústria automobilística) na soldagem de painel de embarcações [11].	23
Figura 3 - Operadores de manipuladores tendo que acompanhar o dispositivo durante a soldagem [3,14].	24
Figura 4 – Fotos do primeiro sistema seguidor de junta implementado pelo LABSOLDA/UFSC (Dutra e Rosa (1995) [18]).	26
Figura 5 - Sistema de deslocamento importado capaz de realizar o movimento de tecimento (Broering (2005) [5]).	27
Figura 6 - Manipulador TARTÍLOPE V2 (Broering (2005) [5]).	28
Figura 7 - TARTÍLOPE V2F montado sobre uma superfície curva (fotografia de Falleiros, 2012).	29
Figura 8 - Equipamentos empregados na soldagem com o manipulador TARTÍLOPE V2F.	30
Figura 9 – Dimensões do corpo de prova utilizado na soldagem com o TARTÍLOPE V2F.	31
Figura 10 - Resultado da soldagem vertical ascendente utilizando-se o manipulador TARTÍLOPE V2F com o corpo de prova alinhado.	32
Figura 11 - Resultado da soldagem com a peça desalinhada em 15° utilizando o TARTÍLOPE V2F em sua configuração inicial, com a trajetória programada representada por uma linha trastejada.	32
Figura 12 - Sistema automatizado de soldagem com sensor de contato do tipo roda-mola [3].	36
Figura 13 - Sistema de correção de trajetória com sensor de contato [13].	36
Figura 14 - Sistema de sensoriamento de trajetória via LASER (Welding Journal, agosto de 1992, p.44).	37
Figura 15 – Sensores indutivos empregados na soldagem de rodas de tratores agrícolas com seguimento de junta (Bonacorso et al. (2011) [27], adaptado).	38
Figura 16 - Componentes do processo de soldagem MIG/MAG (Gohr (2002) [28], adaptado).	39
Figura 17 - Transferência metálica por curto circuito e exemplo de um gráfico de tensão e corrente em uma soldagem por curto circuito (Silva (2005) [27], adaptado).	40
Figura 18 - Principais tipos de tecimento da tocha de soldagem. Em A o triangular, em B o trapezoidal e em C o retangular (Carvalho (2009) [4]).	41
Figura 19 – Variação da corrente de soldagem do processo MIG/MAG convencional no decorrer de uma junta com a tocha centralizada e descentralizada.	42
Figura 20 - Exemplo de um sinal de corrente instantâneo e um sinal filtrado.	43
Figura 21 - Corrente elétrica em função de diferentes DBCPs no processo MIG/MAG convencional.	44

Figura 22 - Variação do comprimento energizado do arame-eletrodo devido ao movimento de tecimento da tocha de soldagem: (a) – extremidade esquerda; (b) – centro; (c) – extremidade direita (Broering (2005) [5]).	45
Figura 23 - Comportamento da corrente e tensão médias ao longo das alterações na DBCP em um ensaio robotizado, sincronizado com aquisição de dados de soldagem, simulando as transições de DBCP em uma junta (Silva (2005) [30]).	46
Figura 24 - Exemplo do comportamento da corrente média na soldagem de junta chanfrada, com oscilação contínua da tocha de soldagem.	47
Figura 25 - Variação da velocidade de aproximação do arame à poça (<i>Vap</i>).	49
Figura 26 - Dimensões do corpo de prova.	51
Figura 27 - Comportamento da corrente média em uma soldagem de junta chanfrada em ensaio sincronizado com aquisições de dados elétricos e mudança de sentido do eixo Y (tecimento).	52
Figura 28 – Diferença presente nos intervalos de tempo em que a tocha desloca-se entre o centro e extremidade da junta quando o conjunto tocha-peça está desalinhado.	53
Figura 29 - Comportamento da corrente média do processo MIG/MAG convencional na soldagem de juntas chanfradas com a peça alinhada e desalinhada.	54
Figura 30 - Filtro passa-baixa com frequência de corte de 1,54 Hz (Broering (2005) [5]).	56
Figura 31 - Atraso gerado pela filtragem do sinal de corrente da soldagem.	57
Figura 32 - Fluxograma do funcionamento da correção automática de trajetória da tocha de soldagem do manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2 [13].	59
Figura 33 – Comportamento da ação de controle utilizada pelo manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2.	60
Figura 34 – Gabinete COMARCI e robô MOTOMAN UP6.	61
Figura 35 – Tela de calibração da compensação de fase e definição dos parâmetros do COMARCI em um robô MOTOMAN UP6.	62
Figura 36 – Fluxograma de funcionamento da ferramenta COMARCI para correção automática de trajetória.	64
Figura 37 – Comportamento da ação de controle utilizada pela MOTOMAN.	65
Figura 38 - Resultado das soldagens de calibração do robô (sequência de realização dos cordões: esquerda para direita e cima para baixo).	70
Figura 39 – Ilustração do comportamento da ação de controle “liga-desliga” sem adição de histerese na soldagem de juntas.	74
Figura 40 - Resultado da soldagem coma peça desalinhada em 15° em relação à trajetória programada, utilizando o sistema MOTOMAN COMARCI.	75
Figura 41 – Gráfico dos valores de diferença de corrente média aquisitados e as correções relativas a cada diferença, obtidas com o algoritmo inicial.	77
Figura 42 - Resultado da soldagem com a peça desalinhada em 15° utilizando o algoritmo II (mudança no limite superior).	78

Figura 43 - Valores de erro aquisitados pelo TARTÍLOPE V2F e as correções respectivas a esses valores resultantes da soldagem com o algoritmo II (primeiro passe).	79
Figura 44 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K".	80
Figura 45 - Resultado da soldagem a peça desalinhada em 15° utilizando o algoritmo III (redução de 25% no valor de "K" e retirada dos limites).	81
Figura 46 - Valores dos erros e das correções resultantes de trechos da soldagem com o algoritmo III.	81
Figura 47 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para a frequência de 1,7 Hz de tecimento.	84
Figura 48 - Resultado da soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento, "K" igual a 0,0131 mm/A e a peça desalinhada 15°.	84
Figura 49 - Valores dos erros e correções resultantes da soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento, "K" igual a 0,0131 mm/A e a peça desalinhada 15°.	85
Figura 50 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para 2,4 Hz de frequência de tecimento.	85
Figura 51 – Linha de tendência das combinações entre "K" e frequência de tecimento.	86
Figura 52 - Comparação entre o valor eficaz obtido por meio da equação 8 e o valor eficaz obtido por meio do <i>Software Excel</i>	90
Figura 53 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 0,5 Hz e a peça alinhada.	91
Figura 54 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 1,7 Hz e a peça alinhada.	92
Figura 55 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 2,4 Hz e a peça alinhada.	92
Figura 56 – Linha de tendência das combinações entre desvio padrão das correções e frequência de tecimento.	93
Figura 57 - Comportamento do desvio padrão das correções realizadas na soldagem com amplitude de 5 mm, 1,7 Hz de frequência de tecimento, peça alinhada e “ganho” igual à um.	94
Figura 58 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para 1,7 Hz de frequência de tecimento com a amplitude aumentada para 5 mm.	95
Figura 59 - Cordão de solda resultante do ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para a soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento e amplitude de 5 mm.	95
Figura 60 - Exemplo de um sistema com controle proporcional, correção igual ao valor de erro, e uma ação de controle por segundo.	97
Figura 61 - Exemplo da influência do cálculo da correção em um sistema com controle proporcional.	97
Figura 62 - Exemplo da presença de erro em regime permanente em soldagem com seguimento automático de junta (soldagem alinhada acima e soldagem desalinhada abaixo).	98

Figura 63 - Definição de "K" para um caso em que nenhum de seus valores é capaz de resultar em um cordão aceitável.	98
Figura 64 - Exemplo da influência do número de ações por segundo em um sistema com controle proporcional.	99
Figura 65 - Exemplo da influência da ação integradora em um sistema de controle.	100
Figura 66 - Fluxograma do novo funcionamento da correção automática de trajetória da tocha de soldagem do manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2F.	101
Figura 67 - Cordão de solda resultante da calibração da soldagem vertical descendente (peça alinhada).	102
Figura 68 - Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a calibração da soldagem vertical descendente.	102
Figura 69 - Resultado da soldagem vertical descendente com a peça desalinhada em 15°.	103
Figura 70 - Comportamento dos erros e das correções da soldagem vertical descendente com a peça desalinhada em 15°.	103
Figura 71 - Soldagem vertical ascendente utilizando um trilho fixado com ventosas, inclinado 15° com a peça.	105
Figura 72 - Comportamento dos erros e das correções da calibração do primeiro passe da soldagem vertical ascendente I.	105
Figura 73 - Comportamento dos erros e das correções da calibração do segundo passe da soldagem vertical ascendente I.	106
Figura 74 - Soldagem vertical ascendente com seguimento de junta utilizando o TARTÍLOPE V2F e um trilho com ventosas.	106
Figura 75 - Soldagem vertical ascendente com a peça inclinada 10° em relação ao trilho do TARTÍLOPE V2F.	107
Figura 76 - Resultado da soldagem de raiz com a peça desalinhada 10° em relação ao trilho do TARTÍLOPE.	108
Figura 77 - Exemplo de um caso em que é necessária a realização de um último passe, mas não há junta suficientemente exposta que permita o seguimento de junta a arco.	109
Figura 78 - Fluxograma do funcionamento da função de gravação de trajetória.	110
Figura 79 - Fluxograma do funcionamento da função de gravação de trajetória.	112
Figura 80 - Terceiro passe da soldagem com o trilho com ventosas, realizado com a função de gravação ativada.	113
Figura 81 - Soldagem realizada a partir da trajetória traçada pelo terceiro passe por meio da função de reprodução de trajetória.	113
Figura 82 - Linha de tendência das combinações entre desvio padrão das correções e frequência de tecimento.	115
Figura 83 - Soldagem realizada a partir da trajetória traçada pelo terceiro passe com redistribuição automática dos tempos de parada nas laterais.	116

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	ANTECEDENTES	24
1.1.1	Primeiros protótipos de ferramentas que utilizam o arco como sensor de procura de junta (LABSOLDA/UFSC)	25
1.1.2	TARTÍLOPE V2	27
1.1.3	Ensaio preliminar de avaliação da funcionalidade de seguimento de junta do manipulador TARTÍLOPE V2F	29
1.2	OBJETIVOS	32
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	33
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1	SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA	35
2.1.1	Sensores de contato	35
2.1.2	Sensores remotos	37
2.2	SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA QUE UTILIZAM O PRÓPRIO ARCO VOLTAICO COMO SENSOR	39
2.2.1	Processo MIG/MAG convencional	39
2.2.2	Associação entre movimentação da tocha e comportamento elétrico da soldagem na interpretação do alinhamento entre tocha e junta	40
2.3	FUNCIONAMENTO DO SEGUIMENTO DE JUNTA DO TARTÍLOPE V2F	55
2.4	FUNCIONAMENTO DO SEGUIMENTO DE JUNTA DE UMA FERRAMENTA COMERCIAL, MOTOMAN COMARCIH	60
2.4.1	Interpretação da posição da tocha de soldagem	61
2.4.2	Reposicionamento da tocha de soldagem	62
3	SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO COM SEGUIMENTO AUTOMÁTICO DA JUNTA E SENSORIAMENTO VIA ARCO ELÉTRICO, POR MEIO DE UMA SOLUÇÃO COMERCIAL ...	67
3.1	APARATO EXPERIMENTAL	67
3.2	METODOLOGIA	68
3.2.1	Calibração do COMARCIH	69
3.2.2	Definição do valor da correção (<i>Correction Amount</i>)	72
3.2.3	Definição do valor de histerese (<i>Dead Zone</i>)	74
3.2.4	Resultado da soldagem vertical com seguimento de junta por meio de uma solução comercial	75
4	MUDANÇAS NA FUNCIONALIDADE DE SEGUIMENTO DE JUNTA DO MANIPULADOR TARTÍLOPE V2F	77
4.1.1	Algoritmo II (1ª modificação)	78
4.1.2	Algoritmo III (2ª modificação)	79
4.2	MELHORIAS NA FUNCIONALIDADE DE SEGUIMENTO DE JUNTA DO TARTÍLOPE V2F	82

4.2.1	Influência da movimentação da tocha de soldagem sobre o automatismo do seguimento de junta.....	82
4.2.2	Influência da configuração e dos componentes da soldagem sobre a variação elétrica e o automatismo do seguimento de junta	87
4.2.3	Controle PI.....	96
4.3	VALIDAÇÃO DAS IMPLEMENTAÇÕES.....	100
4.3.1	Soldagem vertical descendente	101
4.3.2	Soldagem vertical ascendente I.....	104
4.3.3	Soldagem de raiz, vertical ascendente II.....	106
5	GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA	
	SEGUIDA PELO PONTO MÉDIO DO TECIMENTO.....	109
5.1	GRAVAÇÃO DA TRAJETÓRIA	109
5.2	REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA	110
5.3	VALIDAÇÃO DAS FUNÇÕES GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA	112
5.3.1	Funcionalidade experimental para ajuste automático de procedimento em função da inclinação entre trilho e força da gravidade	114
6	CONCLUSÃO	117
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
	REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

A automatização dos processos de fabricação está constantemente associada à conquista de liderança nos mais diversos setores industriais no mundo. Isto é possível, principalmente, devido ao aumento da repetibilidade e diminuição no tempo de produção que a automatização possibilita. Na indústria naval, acontece este fenômeno. Um exemplo disto é a Coreia do Sul, que com a realização de investimentos em sistemas automatizados e mecanizados na construção de embarcações, tornou-se o maior representante atual do setor, abrigando sete das dez maiores empresas do ramo da construção naval, segundo uma pesquisa realizada no ano de 2006 [1].

A soldagem é o processo de fabricação mais utilizado na construção de uma embarcação, correspondendo a, aproximadamente, um terço dos trabalhos [2]. Logo, sua automatização, exemplificada na figura 1, mostra-se como uma importante solução para a redução do tempo de trabalho, aumento da qualidade e consequente aumento na produtividade desse setor.



Figura 1 - Exemplo de automatização da soldagem de embarcações [3].

Sob a ótica da soldagem, a implementação de sistemas automatizados torna-se interessante, principalmente, devido à possibilidade de realização de soldagem por longos períodos com qualidade. Além do mais, são eliminadas as condições desfavoráveis ao soldador, uma vez que este passa a monitorar, não atuando diretamente

na soldagem [4,5]. Essas condições desfavoráveis são, basicamente, a exposição à radiação emitida pelo arco, aos gases tóxicos provenientes de reações químicas e aos salpicos de metal à altas temperaturas. Tudo isso, somado às tarefas necessárias durante a soldagem: regulagem dos parâmetros de soldagem, controle da qualidade do cordão de solda e condução da pistola em posições desconfortáveis; gera um rápido fadigamento do soldador e, conseqüentemente, um baixo índice de produção e qualidade [5]. Ou seja, a automatização das etapas de soldagem possibilita o aumento do tempo de arco aberto, assim como, a melhoria na condição de trabalho dos profissionais da soldagem, contribuindo, desta forma, para o aumento de produtividade sem prejudicar as condições de trabalho dos soldadores.

A automatização da soldagem pode, ainda, influenciar o tempo gasto com correção de elementos estruturais. É estimado um consumo de 30% do trabalho total nas correções envolvidas com as distorções geradas durante a fabricação. Este problema torna-se mais crítico com a busca por redução de peso presente em projetos atuais de construção naval e *offshore*. Atualmente estão sendo utilizados materiais mais resistentes e de menor espessura a fim de melhorar a dirigibilidade, desempenho e economia de combustível das embarcações. Essa redução na espessura das chapas torna mais significativa a influência do calor gerado pela soldagem, nas alterações dimensionais das estruturas [6,7]. Com o aumento da velocidade das soldagens, possibilitado pela automatização, há uma redução na imposição de calor às peças e, desta forma, uma diminuição na ocorrência de desvios durante a fabricação [8].

Com relação à situação nacional da indústria naval, segundo Lucas (2011) [8], 70% dos estaleiros utilizam somente a soldagem manual. Isto acarreta dois grandes problemas ao setor naval brasileiro: dependência de mão de obra especializada, e baixo índice de qualidade e produtividade, se comparado aos setores navais asiático e europeu [8,9], por exemplo. Deste modo, fica claro que o investimento em automatização da soldagem é um passo fundamental para tornar a indústria naval nacional mais competitiva. A posição atual dos estaleiros brasileiros com relação à automatização, no entanto, é influenciada diretamente pela disponibilidade de tecnologias nacionais desta espécie. Conseqüentemente, com a carência atual de equipamentos de soldagem oriundos de tecnologia nacional (diferentemente da Coreia do Sul), e os elevados custos de aquisição e de manutenção dos equipamentos de origem estrangeira, atualmente, esse tipo de investimento acaba sendo pouco atrativo para os estaleiros brasileiros [4].

De modo geral, o desenvolvimento da automatização dos processos de soldagem na construção naval representa um desafio não apenas para os estaleiros brasileiros, mas para todo o mundo. Os sistemas automatizados de soldagem com maior inteligência, comuns na indústria automobilística, não podem ser utilizados com a mesma amplitude na indústria naval em função das diferentes posições de soldagem e das tarefas não padronizadas [10,4], como apresentado no exemplo da figura 2.

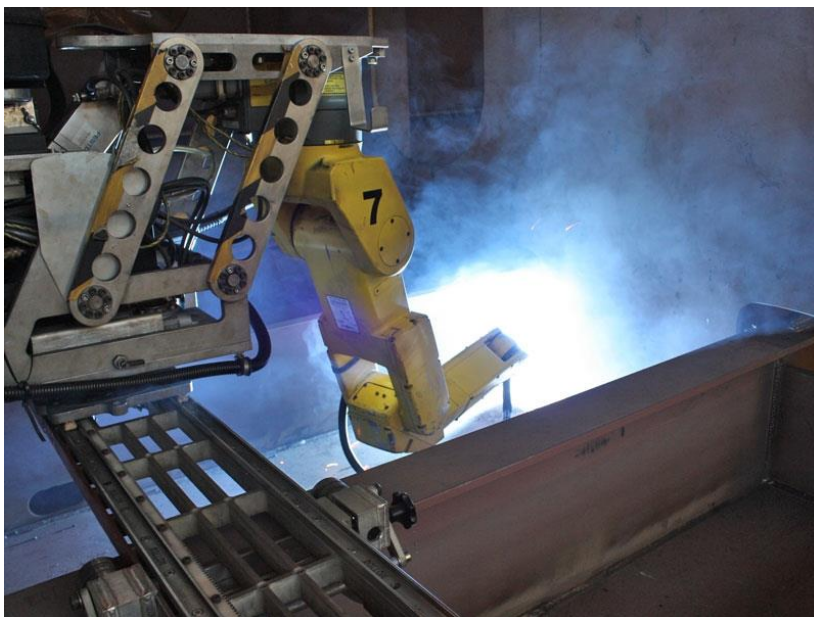


Figura 2 - Exemplo da aplicação de robô antropomórfico (comumente utilizado na indústria automobilística) na soldagem de painel de embarcações [11].

Com a crescente demanda nacional - como exemplo, as construções, até 2020, de cinquenta plataformas de produção, cinquenta sondas de perfuração, quinhentas embarcações *offshore* e cento e trinta petroleiros, encomendadas pela PETROBRAS [12] - são necessárias soluções para os problemas expostos de modo a tornar a indústria naval brasileira mais competitiva em termos de preço e qualidade.

1.1 ANTECEDENTES

Como já mencionada, a automatização dos processos de soldagem permite que o soldador não tenha contato direto com a solda, diminuindo ou eliminando completamente seu envolvimento durante a operação de soldagem. Tal fato proporciona um aumento do tempo de arco aberto e, conseqüentemente, da produtividade do processo, além de permitir que o soldador seja menos qualificado. Entretanto, há vários níveis de automatização. À medida que as funções exercidas pelo soldador são transferidas ao sistema, a produção se torna mais eficaz, porém, o custo e complexidade dos equipamentos envolvidos também aumentam. Há, portanto, aspectos técnicos e econômicos que definem a escolha e implantação de tais sistemas [13].

Fundamentalmente, sistemas automatizados operam fielmente à maneira que forem programados. No caso da soldagem automatizada, a dificuldade em se garantir repetitividade no posicionamento das peças ou do sistema, e, também, as deformações das peças durante a soldagem, implicam a necessidade de reajuste na trajetória programada da tocha durante a soldagem. Existem, basicamente, dois modos de este problema ser resolvido: manualmente e automaticamente.

Quando o reajuste da trajetória programada da tocha de soldagem é realizado de maneira manual, como na figura 3, a constante atenção do operador/soldador para com a soldagem permite que a tocha seja conduzida da maneira desejada por toda a extensão da junta. Contudo, o soldador/operador torna-se limitado, uma vez que sua atenção deve estar focada exclusivamente na soldagem, acompanhando a tocha durante toda extensão da solda, e, assim, é limitada, por exemplo, a operação de um único equipamento por vez.

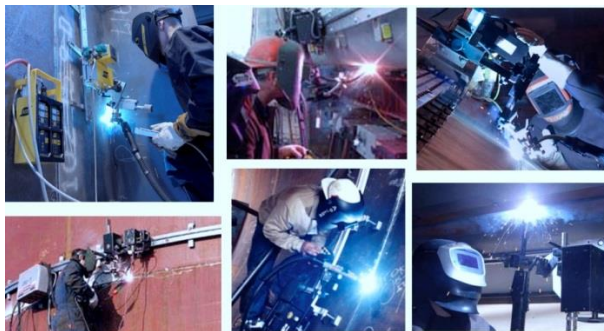


Figura 3 - Operadores de manipuladores tendo que acompanhar o dispositivo durante a soldagem [3,14].

No caso do modo automático de reajuste da trajetória programada da tocha de soldagem, o sistema automatizado encarrega-se de realizar as correções necessárias na trajetória de maneira independente, por meio de um sensor. Desta forma, é possível que, por exemplo, um operador/soldador opere vários sistemas simultaneamente e, conseqüentemente, haja um aumento na produção.

Existem diversos tipos de sensores capazes de possibilitar o reajuste automático da trajetória programada da tocha de soldagem. A maioria destes, entretanto, é sensível ao ambiente de soldagem, alguns não possuem precisão suficiente para a realização eficaz de algumas soldagens, e outros não permitem certos tipos de movimentação da tocha, tornando pouco interessante seus empregos. Entretanto, existe um tipo de sensoriamento que não apresenta nenhuma destas desvantagens, o sensoriamento a arco (*through-the-arc sensing* [15,16] ou *arc sensor* [17]).

Sensoriamento a arco consiste na análise do comportamento elétrico da soldagem como fonte de informação da posição da tocha em relação à peça, e está presente em grande parte dos robôs antropomórficos especialmente dedicados à soldagem.

Apesar das vantagens do sensoriamento a arco, este não é presente em, praticamente, nenhum tipo de sistema automatizado de soldagem além de robôs antropomórficos. Por este motivo, o Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA/UFSC) possui um histórico de desenvolvimento de ferramentas que utilizam este tipo de sensoriamento.

1.1.1 Primeiros protótipos de ferramentas que utilizam o arco como sensor de procura de junta (LABSOLDA/UFSC)

Por volta de 1995, o LABSOLDA/UFSC realizou a primeira tentativa brasileira de desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta guiado pelo arco. Para desenvolver tal projeto, foi necessário um sistema de deslocamento com dois graus de liberdade, encarregado da realização simultânea dos movimentos de tecimento e avanço da tocha. Tal dispositivo foi desenvolvido a partir de um equipamento emprestado pelo Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia, LAPROSOLDA, que realizava o movimento oscilatório da pistola de soldagem, e de um sistema que fazia com que a mesa em que estava apoiado o corpo de prova se deslocasse com uma velocidade determinada (figura 4) [18].

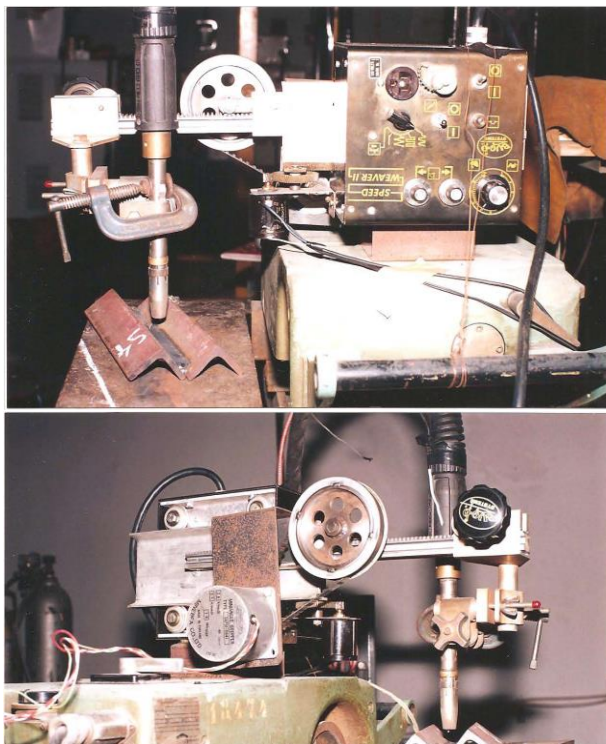


Figura 4 – Fotos do primeiro sistema seguidor de junta implementado pelo LABSOLDA/UFSC (Dutra e Rosa (1995) [18]).

No primeiro sistema seguidor de junta implementado pelo LABSOLDA/UFSC, a corrente de soldagem era medida por meio de um sensor de efeito Hall. O valor da corrente instantânea era, então, convertido em corrente média por meio de uma unidade de tratamento de sinal (filtro passa-baixas). A posição da tocha de soldagem era medida por meio de um potenciômetro multivoltas acoplado ao eixo oscilatório. Os sinais analógicos de corrente e posição eram convertidos para digital, por meio de um conversor A/D, e então transferidos para um microcomputador com um software de controle do sistema de seguimento de junta. O sistema atuava junto ao drive de potência do motor de passo do equipamento, modificando o valor médio do tecimento, a fim de que a diferença entre os valores de corrente nas extremidades do movimento fosse nula [18].

Após o trabalho bem sucedido no desenvolvimento do algoritmo de seguimento de junta, o próprio LABSOLDA/UFSC, ainda na mesma época, adquiriu um sistema de deslocamento, apresentado na figura 5, capaz de realizar o movimento de tecimento. Um dos objetivos da aquisição deste equipamento era o aprimoramento do sistema de seguimento de junta. Este equipamento, chamado BUG-O MATIC, fabricado pela empresa americana BUG-O, possui uma grande incerteza nos parâmetros de soldagem e tecimento devido ao fato de sua regulagem ser totalmente analógica. Contudo, ele possui uma função capaz de modificar o ponto médio do tecimento por meio de um potenciômetro em seu painel de controle. A equipe do LABSOLDA/UFSC retirou este potenciômetro e substituiu-o por uma saída analógica do controlador de seguimento de junta, possibilitando a atuação deste sobre o ponto médio do equipamento BUG-O MATIC. Com isso, foi possível a realização de correção automática de trajetória com o equipamento da BUG-O [5].



Figura 5 - Sistema de deslocamento importado capaz de realizar o movimento de tecimento (Broering (2005) [5])

1.1.2 TARTÍLOPE V2

Uma vez estabelecida uma técnica funcional de procura de junta, o LABSOLDA/UFSC iniciou o desenvolvimento de um sistema movimentador de tocha de soldagem, de tecnologia nacional, capaz de embutir essa funcionalidade. Este sistema foi denominado TARTÍLOPE V2 e foi descrito pela primeira vez no trabalho de Costa (2003) intitulado “Sistema de Seguimento de Junta que Utiliza o Arco Elétrico como Sensor” [13]. Neste trabalho, Costa aborda tanto o desenvolvimento das partes mecânica e eletrônica do manipulador, quanto da funcionalidade de seguimento de junta para a posição plana,

incluindo a análise do comportamento de três algoritmos de seguimento de junta.

Em meados de 2005, o desenvolvimento do manipulador TARTÍLOPE V2 é continuado por Broering, em seu trabalho “Desenvolvimento de Sistemas para Automatização da Soldagem e do Corte Térmico”. Neste trabalho, Broering relata melhorias e implementações realizadas no manipulador; algumas, das quais, necessárias para o atendimento de três aplicações industriais, uma delas envolvendo a utilização de seguimento de junta na empresa WEG¹ [5]. Esta versão do TARTÍLOPE é apresentada na figura 6.



Figura 6 - Manipulador TARTÍLOPE V2 (Broering (2005) [5]).

Alguns anos após o trabalho de Broering, em meados de 2008, foi realizada uma última mudança no TARTÍLOPE V2. Esta mudança se dá, basicamente, na rigidez do trilho (eixo X). Nesse caso, foi desenvolvida outra versão do manipulador, em que é utilizado um trilho flexível ao invés do trilho rígido, como apresentada na figura 7. Essa versão precede o presente trabalho, é denominada TARTÍLOPE V2F e seu trilho se molda a superfícies curvas, viabilizando as soldagens do casco, blocos e painéis de navios, com a maior parte dos processos de soldagem [8].

¹ TARTÍLOPE V2 adaptado em um sistema com mesa rotativa, empregado na soldagem do fundo de carcaças de transformadores [5].

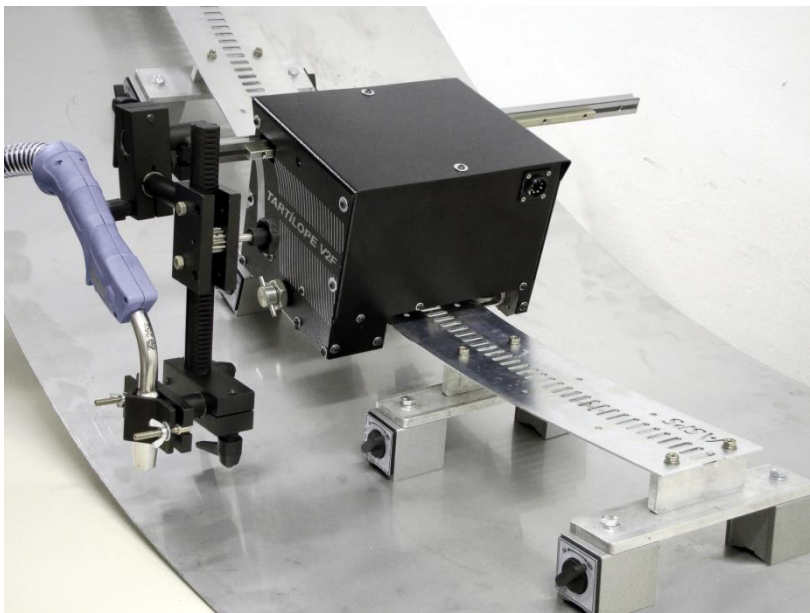


Figura 7 - TARTÍLOPE V2F montado sobre uma superfície curva (fotografia de Falleiros, 2012).

1.1.3 Ensaio preliminar de avaliação da funcionalidade de seguimento de junta do manipulador TARTÍLOPE V2F

Em 2009 - com o início do projeto CTAquaviário, de automatização da soldagem na indústria naval, financiado pelo FINEP - passou a ser necessária a utilização da funcionalidade de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F em soldagens fora de posição². Porém, nessa época, foi constatado o não funcionamento do seguimento de junta nas soldagens verticais pretendidas. Desta forma, esse trabalho inicia-se com a realização de um ensaio preliminar, baseado nessa constatação, para verificar o comportamento do seguimento de junta neste tipo de soldagem. A seguir são descritos o aparato experimental, a metodologia e o resultado alcançado neste ensaio.

² Termo que se refere à realização de soldagem em posições diferentes da plana [19].

1.1.3.1 Aparato experimental

O ensaio inicial envolvendo o manipulador TARTÍLOPE V2F foi realizado utilizando a estrutura do LABSOLDA/UFSC. A fonte de soldagem utilizada uma IMC INVERSAL 300, mutiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do transformador. O sistema de movimentação utilizado foi um manipulador TARTÍLOPE V2F. Estes equipamentos estão apresentados na figura 8.

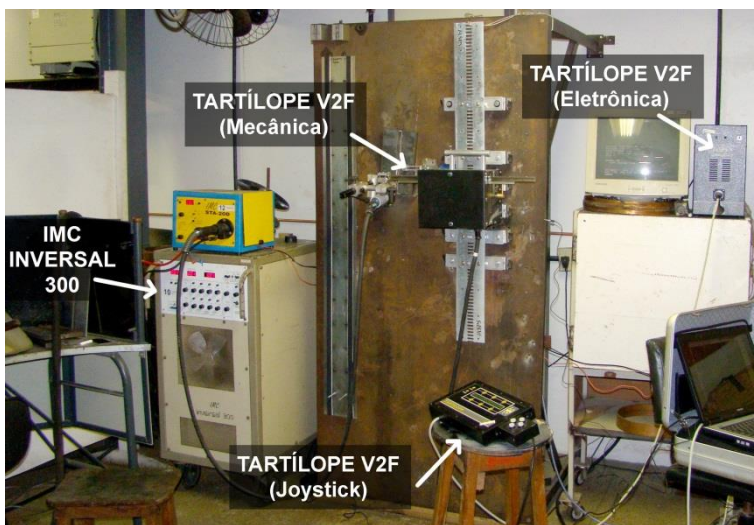


Figura 8 - Equipamentos empregados na soldagem com o manipulador TARTÍLOPE V2F.

1.1.3.2 Metodologia

O ensaio com seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F teve como enfoque a soldagem de junta na posição vertical ascendente e contou com um tipo de peça que simula o perfil de uma junta em “V”. Esta peça foi empregada devido à possibilidade de redução na quantidade metal necessária por ensaio. Ao invés de utilizar duas chapas de 16 mm de espessura, cada uma chanfrada em 30°, este corpo de prova é composto por duas chapas, também de aço carbono, com 6,35 mm de espessura, 2,54 mm de largura, unidas em 60° e distanciadas 3,2 mm uma da outra, como apresentada na figura 9.

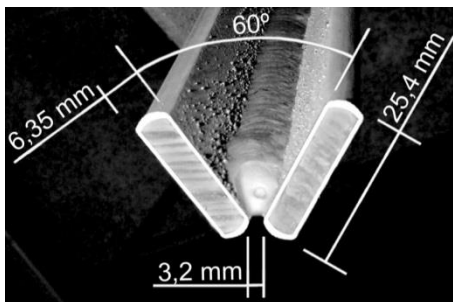


Figura 9 – Dimensões do corpo de prova utilizado na soldagem com o TARTÍLOPE V2F.

Para a validação da correção de trajetória, foi estabelecido um ângulo arbitrário de 15° de desalinhamento entre a linha central da junta e o trilho do manipulador.

Os passes de preenchimento dos corpos de prova foram definidos a partir de uma soldagem com a peça alinhada, cada qual com uma regulagem de parâmetros de movimentação diferente que estão apresentadas na tabela 1. A fonte de soldagem foi regulada em 50 mm/s (3 m/min) de alimentação de arame, 19 V, com efeito indutivo de subida da máquina ajustado em 0,5 e descida em 4,5. Foi utilizado como gás de proteção uma mistura de 75% Ar e 25% CO_2 com 267 ml/s (16 l/min) de vazão.

Tabela 1 - parâmetros de movimentação utilizados nos ensaios.

Passe	Velocidade de soldagem	Amplitude do tecimento	Frequência do tecimento	Tempos de parada
1	1 mm/s	3,7 mm	0,5 Hz	0,64/0,64 s
2	0,9 mm/s	8,3 mm	0,5 Hz	0,5/0,5 s
3	0,8 mm/s	12,2 mm	0,5 Hz	0,4/0,4 s
4	0,8 mm/s	14,9 mm	0,4 Hz	0,4/0,4 s

O resultado da soldagem descrita acima, com o corpo de prova alinhado, é apresentado na figura 10 e apresenta-se com bom aspecto em todos os passes.



Figura 10 - Resultado da soldagem vertical ascendente utilizando-se o manipulador TARTÍLOPE V2F com o corpo de prova alinhado.

1.1.3.3 Resultado da soldagem com seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F na posição vertical

Uma vez estabelecida a movimentação da tocha, foi realizada a soldagem da peça, dessa vez, posicionada desalinhada 15° em relação ao trilho do TARTÍLOPE V2F, com o seguimento de junta habilitado. Segundo o resultado deste ensaio, apresentado na figura 11, é constatado o não funcionamento da correção.



Figura 11 - Resultado da soldagem com a peça desalinhada em 15° utilizando o TARTÍLOPE V2F em sua configuração inicial, com a trajetória programada representada por uma linha tracejada.

1.2 OBJETIVOS

O ensaio preliminar envolvendo a funcionalidade de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F mostrou que essa solução, apesar de possuir aplicação industrial, não é apta à realização de determinadas soldagens verticais. Dessa forma, o presente trabalho é vinculado ao projeto CTAquaviário e tem como objetivo o aumento do nível de automação do TARTÍLOPE V2F na realização da soldagem de juntas fora de posição, de modo a ser possível, nestas soldagens, o seguimento automático da junta, utilizando sensoriamento a arco. Para que este objetivo possa ser cumprido, devem ser atingidas, mais especificamente, as seguintes metas:

- Determinar os principais fenômenos responsáveis pela variação de corrente, surgida durante a soldagem de juntas pelo processo MIG/MAG convencional;

- Avaliar a utilização de uma solução comercial da empresa MOTOMAN na soldagem de junta vertical ascendente, de uma peça desalinhada 15° em relação à trajetória programada.
- Desenvolver procedimentos que possibilitem o emprego do TARTÍLOPE V2F na soldagem descrita acima;
- Desenvolver uma estratégia de registro e reprodução da trajetória média traçada pela tocha. Esta estratégia é principalmente necessária no passe final, quando a junta, muitas vezes, não está suficientemente exposta, dificultando ou impossibilitando o sensoriamento a arco, e é conhecida como *Automatic Multi-Layer Welding*³.

Costa (2003) aborda a importância do cumprimento de objetivos como o deste trabalho. Em suas palavras:

Como geralmente os sensores de arco vêm incorporados a robôs industriais, pequenas e médias empresas acabam não usufruindo os ganhos em produtividade e competitividade alcançados com essa tecnologia. E mesmo quando micro e pequenas empresas conseguem adquirir tais dispositivos, defrontam-se com a falta de profissionais habilitados capazes de manusear corretamente o equipamento, resultando muitas vezes na subutilização do dispositivo e na consequente frustração do comprador [13].

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em sete capítulos, sendo a introdução o primeiro.

No capítulo dois, é fundamentado o funcionamento de diferentes tipos de sistemas de seguimento de junta, com enfoque especial aos sistemas que utilizam sensoriamento a arco. Neste caso, ainda, é descrito o fenômeno que a literatura em geral considera como influência principal nas variações de corrente elétrica, surgidas durante a soldagem

³ Termo utilizado por empresas da área de robótica para designar a realização de preenchimento de juntas de forma automática, utilizando a trajetória estabelecida no primeiro passe como base para os passes seguintes [20,22,21].

de juntas pelo processo MIG/MAG convencional. Em seguida, é apresentado um fenômeno não encontrado na literatura⁴ que, constatando-a, mostra-se como a principal influência sobre a corrente de soldagem de juntas.

Ainda no capítulo dois, são descritos os funcionamentos de dois sistemas de seguimento de junta guiado pelo arco, fundamentando-os, inclusive, segundo teoria básica de controle. Um destes é o TARTÍLOPE V2F, de origem nacional, desenvolvido pelo Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLDA/UFSC, e outro importado, desenvolvido pela empresa japonesa MOTOMAN.

No capítulo três, é avaliado o seguimento de junta oferecido pela empresa MOTOMAN.

No capítulo quatro, são retomadas as soldagens fora de posição utilizando o TARTÍLOPE V2F. Inicialmente, são descritas as modificações necessárias para seu funcionamento na soldagem desejada, e, na sequência, é descrita uma série de melhorias que tiveram por objetivo o aumento da confiabilidade e robustez desse sistema, além dos resultados que validaram tais melhorias.

No capítulo cinco, é descrito o desenvolvimento de duas funcionalidades para o TARTÍLOPE V2F: gravação e reprodução da trajetória média seguida pela tocha de soldagem.

No capítulo seis, é concluído o trabalho a partir dos resultados alcançados, e, na sequência, no capítulo sete, são listadas sugestões para trabalhos futuros que se encaixem no mesmo contexto deste trabalho.

⁴ Segundo pesquisa realizada pelo autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA

Como mencionada, a utilização de manipuladores robóticos de soldagem pode ser um primeiro passo para o aumento da produtividade de uma empresa. Entretanto, este tipo de emprego - como foi apresentado na figura 3, na página 24 - torna necessária a atuação de um operador/soldador durante a soldagem, corrigindo regularmente a trajetória da tocha. Uma maneira de reduzir esta dependência é a utilização de sistemas automatizados capazes de interpretar, por meio de algum tipo de sensor, a posição da tocha em relação à junta e, a partir daí, corrigir automaticamente sua trajetória durante a soldagem. Existem diversos tipos de sensores aplicáveis a este tipo de situação, cada qual utilizando diferentes princípios físicos. Segundo Lindén [23], estes podem ser divididos em duas categorias básicas: sensores de contato e sensores remotos.

2.1.1 Sensores de contato

Este é o tipo de sensoriamento tido como o mais antigo [24]. Dispositivos equipados com esse tipo de sensor abrangem desde sistemas mecânicos simples a sistemas eletromecânicos complexos. O sistema roda-mola, no qual uma roda metálica é posta em contato com a superfície a ser seguida, é o sistema mais simples que pode ser encontrado [25]. Nestes equipamentos, as variações na superfície da peça são captadas pelo conjunto roda-mola. Com isso, a tocha de soldagem segue os movimentos gerados pela deflexão da mola (figura 12).

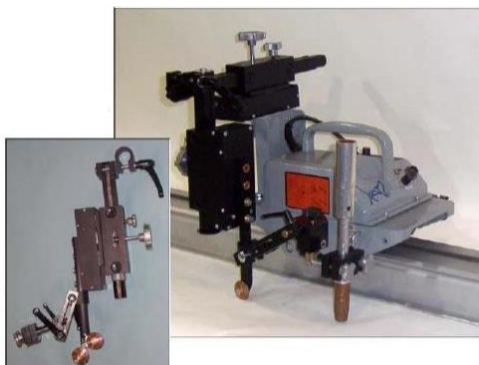


Figura 12 - Sistema automatizado de soldagem com sensor de contato do tipo roda-mola [3].

Um caso de sensoriamento eletromecânico é a utilização de uma sonda de contato. Nestes casos, uma sonda metálica entra em contato com a superfície da peça a ser soldada, que pode ser uma junta em “V”, uma junta em “T” ou similar, e, a partir deste contato, são gerados sinais elétricos para um sistema de controle (figura 13).

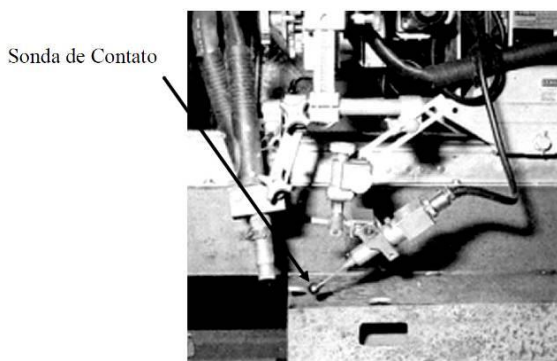


Figura 13 - Sistema de correção de trajetória com sensor de contato [13].

As principais desvantagens dos sensores por contato são:

- Sensoriamento distante da tocha de soldagem (distância de offset). Assim, o sistema sempre responderá por uma situação distante da poça de fusão.
- Diminuição da acessibilidade da tocha devido à necessidade do acoplamento de dispositivos adicionais;
- Desgaste do sensor.

2.1.2 Sensores remotos

Os sensores remotos têm-se tornado mais populares nos últimos anos. Isso ocorreu devido à redução do custo dos equipamentos e à excelente precisão que alguns sensores dessa categoria podem alcançar. Os princípios físicos mais empregados nestes sensores são: ultra-som, magnetismo, ótica e eletricidade.

Os sensores de ultra-som baseiam-se na determinação do tempo Δt - intervalo de tempo entre os instantes em que o pulso é transmitido e recebido - para medir a distância entre o sensor e o metal de base [26].

Sensores magnéticos usam a corrente parasita gerada no metal de base para reconhecer a geometria da junta. Isso ocorre devido à geração de um campo magnético através de uma bobina que está localizada próxima ao metal de base. Por meio de uma segunda bobina, a variação da corrente é detectada [13].

Dentre os sistemas óticos, destacam-se os que utilizam tecnologia LASER (figura 14). Neste caso, um feixe de luz varre a junta transversalmente e uma unidade de controle identifica a geometria, possibilitando o ajuste da trajetória da tocha [13].

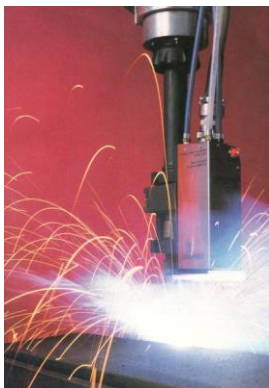


Figura 14 - Sistema de sensoriamento de trajetória via LASER (Welding Journal, agosto de 1992, p.44).

A indutância ou corrente induzida no metal de base é um dos princípios elétricos que possibilitam sensoriamento de posição. Neste caso, o sensor induz um campo eletromagnético de alta frequência a partir de uma bobina ressonante, instalada na face sensora. As mudanças surgidas no campo durante a aproximação de um metal afetam a tensão do sinal de corrente induzido pelo sensor. Desta forma, é possível

estabelecer uma relação entre proximidade da peça e a tensão desse sinal. Esse princípio é bastante empregado em sensores fins-de-curso, no entanto, é possível utilizá-los também no seguimento de junta, em soldagem automatizada. Um exemplo disto é o emprego de sensores indutivos, realizado por Bonacorso et al. (2011) [27], na automatização das soldagens envolvidas na fabricação de rodas de tratores agrícolas. Estas rodas são fabricadas em aço e as finas chapas (3 mm) que compõe suas laterais têm suas formas modificadas durante as soldagens circunferenciais. Este motivo implicou a necessidade de seguimento automático das juntas nestas soldagens, e, desta forma, como está apresentada nessa figura 15, foi optada a utilização de sensores indutivos.

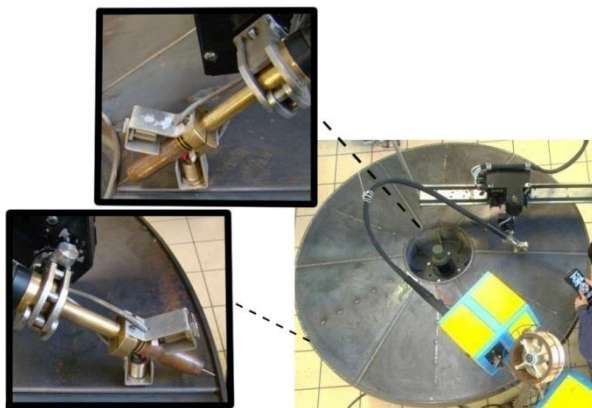


Figura 15 – Sensores indutivos empregados na soldagem de rodas de tratores agrícolas com seguimento de junta (Bonacorso et al. (2011) [27], adaptado).

Os sensores elétricos mais conhecidos comercialmente em soldagem (disponíveis em um grande número de robôs) são os chamados “sensores a arco”. Eles utilizam as próprias variações da corrente ou da tensão de soldagem para obter informações do posicionamento da tocha em relação à junta. Segundo Dutra e Rosa [18], algumas das vantagens deste tipo de sensoriamento são:

- Não existe custo do sensor;
- Não existe offset de medição (distância entre tocha e sensoriamento), como nos outros casos de sensores remotos;
- Indiferença à radiação do arco, respingos e fumos;
- Facilidade de implementação do sensor no processo MIG/MAG convencional.

As principais desvantagens dos sensores a arco são a necessidade de filtragem do sinal, e de utilização do movimento de tecimento.

2.2 SISTEMAS DE SEGUIMENTO DE JUNTA QUE UTILIZAM O PRÓPRIO ARCO VOLTAICO COMO SENSOR

Neste capítulo serão tratados os principais fenômenos que possibilitam aos sistemas de seguimento de junta sensorizados pelo arco elétrico a interpretação da posição da tocha em relação à juntas chanfradas, em soldagens com o processo MIG/MAG convencional.

2.2.1 Processo MIG/MAG convencional

O processo de soldagem MIG/MAG convencional é o que utiliza uma das formas mais simples de equipamento (figura 16). A fonte de energia é do tipo tensão constante, sendo a corrente elétrica uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação do arame e das suas características físicas e químicas. Assim, as variáveis previamente reguláveis são a tensão e a velocidade do arame-eletrodo. De acordo com o nível das mesmas, e, também, em dependência do tipo de gás de proteção, o processo apresenta diferentes configurações de transferência metálica [28].

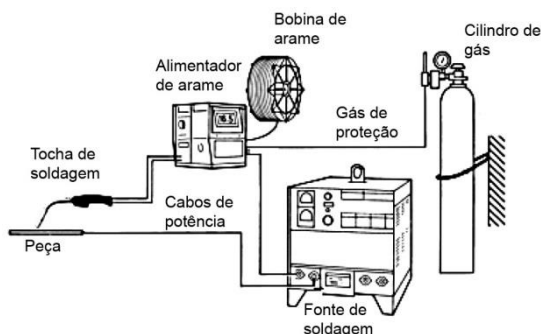


Figura 16 - Componentes do processo de soldagem MIG/MAG (Gohr (2002) [28], adaptado).

As configurações de transferência metálica do processo MIG/MAG convencional diferem-se, basicamente, quanto à ocorrência de curto-circuito. *Grosso modo*, quanto menor a quantidade de energia

empregada na soldagem, maior é a dependência de curto-circuito para a transferência metálica, e, conseqüentemente, maior é a ocorrência deste.

Na maioria das aplicações com o processo MIG/MAG convencional, incluindo grande parte das soldagens empregadas na indústria naval, a quantidade de energia empregada é relativamente baixa, e, desta forma, é caracterizada como soldagem por curto-circuito (figura 17).

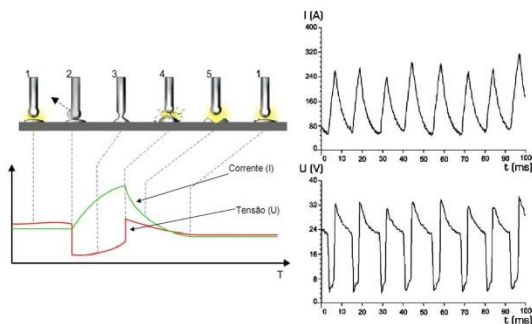


Figura 17 - Transferência metálica por curto circuito e exemplo de um gráfico de tensão e corrente em uma soldagem por curto circuito (Silva (2005) [27], adaptado).

2.2.2 Associação entre movimentação da tocha e comportamento elétrico da soldagem na interpretação do alinhamento entre tocha e junta

Para cada posição e geometria da junta de soldagem existe um tipo de movimentação da tocha que proporciona um melhor resultado. Na posição plana, com junta de topo, por exemplo, a tocha é geralmente deslocada sobre a junta no sentido longitudinal da soldagem. Nas soldagens de juntas chanfradas (bastante comuns na indústria naval), entretanto, é comumente utilizada a técnica conhecida como tecimento ou costura, representada na figura 18. Esta técnica é caracterizada pela deposição de material com oscilação transversal da tocha sobre o chanfro, o qual possibilita um aumento na largura dos cordões, e uma redução no número de passes de solda [8].

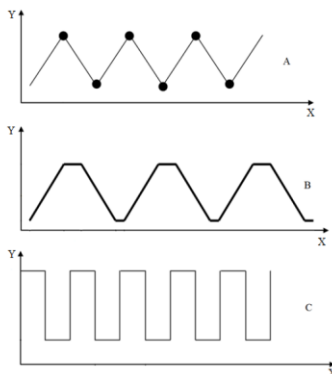


Figura 18 - Principais tipos de tecimento da tocha de soldagem. Em A o triangular, em B o trapezoidal e em C o retangular (Carvalho (2009) [4]).

As variáveis envolvidas e suas unidades usuais são [4]:

- Velocidade de soldagem (mm/s): é a velocidade de deslocamento longitudinal da tocha, ou seja, é a velocidade correspondente à do eixo X;
- Amplitude (mm): é a distância entre extremidades do movimento de tecimento do eixo Y;
- Frequência (Hz): é o número de ciclos de oscilação de tecimento do eixo Y por segundo;
- Tempo de parada (s): é o tempo no qual a tocha se desloca apenas no eixo X nos movimentos trapezoidal e retangular. E o tempo que a tocha fica parada no eixo X e Y no movimento triangular.

Os sistemas de seguimento de junta para o processo MIG/MAG convencional, que utilizam o arco voltaico como sensor, fundamentam-se na variação da corrente de soldagem, surgida durante o movimento de oscilação da pistola ao longo da seção transversal da junta, como exemplificado na figura 19. Por meio da comparação entre os valores da corrente elétrica nas extremidades do movimento oscilatório, é realizada uma verificação quanto à presença de desalinhamento entre o conjunto tocha-peça e, a partir da diferença obtida pela comparação, é realizada a correção. Deste modo, para que um sistema com seguimento de junta a arco elétrico possa ser utilizado, é estritamente necessária a utilização de movimentos de tecimento da tocha de soldagem.

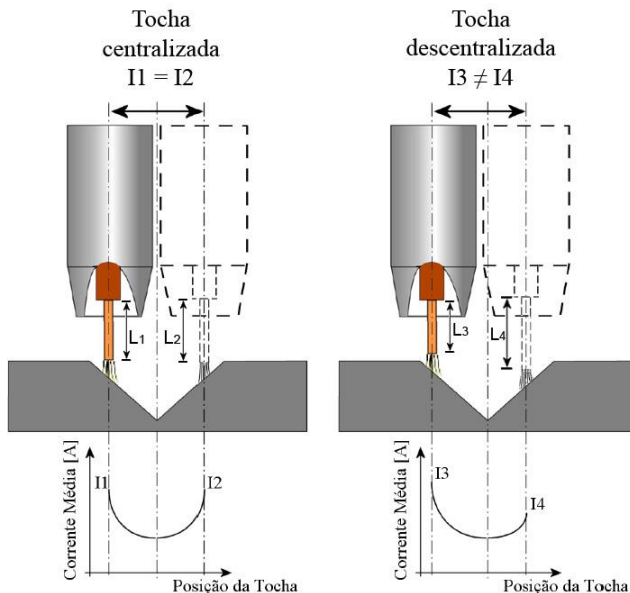


Figura 19 – Variação da corrente de soldagem do processo MIG/MAG convencional no decorrer de uma junta com a tocha centralizada e descentralizada.

Como mencionada anteriormente, a maioria das aplicações com o processo MIG/MAG convencional é caracterizada como soldagem por curto-circuito. Assim, devido à característica altamente dinâmica dos sinais elétricos da soldagem por curto circuito, é necessário o condicionamento deste sinal, de modo a tornar clara a interpretação da condição da soldagem. Este condicionamento do sinal provindo da soldagem pode ser realizado com a utilização de filtros passa-baixa. Estes filtros se encarregam de adicionar um fator de amortecimento ao sinal elétrico, podendo ser maior ou menor, dependendo da frequência de corte ajustada no filtro. A figura 20 apresenta o exemplo do efeito de amortecimento em um sinal referente à corrente de soldagem, em que é possível observar que o sinal sem filtro apresenta bruscas variações de valores, enquanto que no caso do sinal filtrado, a variação se torna muito pequena, restando basicamente a variação ocasionada pela movimentação da tocha.

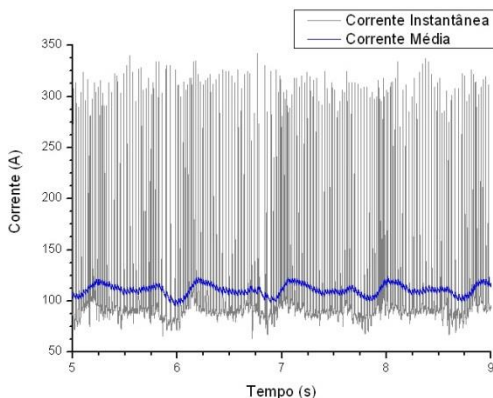


Figura 20 - Exemplo de um sinal de corrente instantâneo e um sinal filtrado.

A variação da corrente na soldagem de juntas acontece devido às mudanças ocorridas na distância entre tocha e peça. Estas mudanças influenciam os valores elétricos da soldagem pelo processo MIG/MAG convencional devido, principalmente, a dois fenômenos: variação da resistência elétrica do comprimento energizado do arame-eletrodo, e variação da velocidade de aproximação do arame à poça de fusão.

2.2.2.1 Variação da corrente média em soldagem de juntas devido a mudanças na resistência elétrica do comprimento energizado do arame-eletrodo.

O primeiro fenômeno, responsável pela variação elétrica mencionada anteriormente, a ser abordado, é a variação da resistência elétrica do comprimento energizado do arame eletrodo, em acordo com a posição da tocha na junta.

No processo MIG/MAG convencional, o afastamento da tocha em relação à peça, e consequente aumento do comprimento energizado do arame-eletrodo (*stick out*⁵), gera um aumento na resistência elétrica do circuito de soldagem. Por sua vez, este aumento na resistência acaba por influenciar a condução elétrica no circuito que, por ser controlado por tensão (tensão constante), acarretará em uma mudança na intensidade da corrente elétrica. Ou seja, como é demonstrado na figura 21, a corrente elétrica no processo MIG/MAG convencional é

⁵ Distância entre o bico de contato elétrico da tocha de soldagem e a extremidade do arame eletrodo (extensão exposta de arame).

inversamente proporcional ao comprimento energizado do arame-eletrodo e, conseqüentemente, à distância entre o bico de contato da tocha de soldagem e a peça (DBCP).

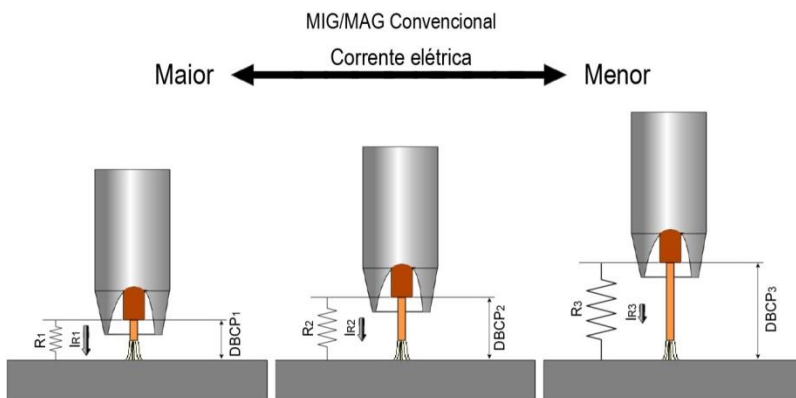


Figura 21 - Corrente elétrica em função de diferentes DBCPs no processo MIG/MAG convencional.

O fenômeno descrito acima é comumente empregado em sistemas de correção de DBCP, em que algum mecanismo ajusta continuamente a distância entre a tocha de soldagem e a peça de acordo com a impedância atual do circuito de soldagem.

Como o comprimento energizado do arame-eletrodo é continuamente variado durante a soldagem de juntas chanfradas (figura 22), têm-se diferentes condições elétricas no circuito da soldagem em acordo com a posição da tocha na junta. Assim, quando a tocha realiza o tecimento de maneira alinhada em relação à junta, o comprimento energizado do arame-eletrodo (L) nos extremos do movimento de tecimento são iguais; quando realiza de maneira desalinhada, são diferentes, influenciando, deste modo, os valores de corrente elétrica nos extremos.

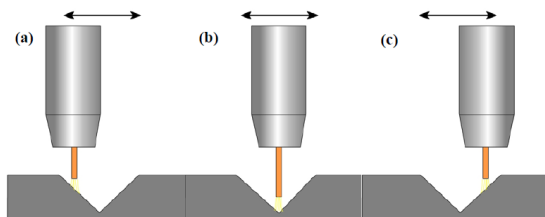


Figura 22 - Variação do comprimento energizado do arame-eletrodo devido ao movimento de tecimento da tocha de soldagem: (a) – extremidade esquerda; (b) – centro; (c) – extremidade direita (Broering (2005) [5]).

O fenômeno de variação da resistência elétrica do *stick out* é, segundo muitos autores [5,8,13,15,16,18,29], o responsável pela variação elétrica que acontece nas soldagens com tecimento em juntas chanfradas pelo processo MIG/MAG convencional. Entretanto, Jiluan (2003), em seu livro *Arc Welding Control* [17], alerta que este tipo de consideração só é válido em situações muito específicas, quando se utiliza frequências extremamente baixas de oscilação da tocha. Ele explica que não basta ser considerado o estado estático, mas, também, o estado dinâmico destas soldagens. Assim, quando ocorre alguma variação na distância entre tocha e peça, haverá tanto uma variação estática da corrente - que seria, basicamente, devido à mudança na resistência elétrica do *stick out* - quanto uma variação dinâmica. Esta variação dinâmica não é detalhada pelo autor, e segundo ele, não fora estudada até a data da publicação de seu livro.

Em 2005, Silva, em seu trabalho de estudo e desenvolvimento da soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz [30], apresenta, então, um fenômeno que possibilita o início de uma mudança de paradigma, com relação à interpretação das variações da corrente média nas soldagens de juntas chanfradas. Isso é devido à evidência constatada em um de seus ensaios, apresentado na figura 23, simulando as transições de DBCPs em uma junta, de que a variação da corrente sofrida pela mudança de resistência do *stick out* é, na verdade, muito pequena, se comparada à variação ocorrida durante transição da DBCP. Em outras palavras, a partir deste ensaio, é evidenciada a diferença de influência dos dois estados - estático e dinâmico - na variação da corrente média das soldagens pelo processo MIG/MAG convencional. Assim, por meio desta constatação, é aberto um caminho para novas interpretações dos fenômenos que tangem as variações elétricas ocorridas durante a soldagem de juntas chanfradas.

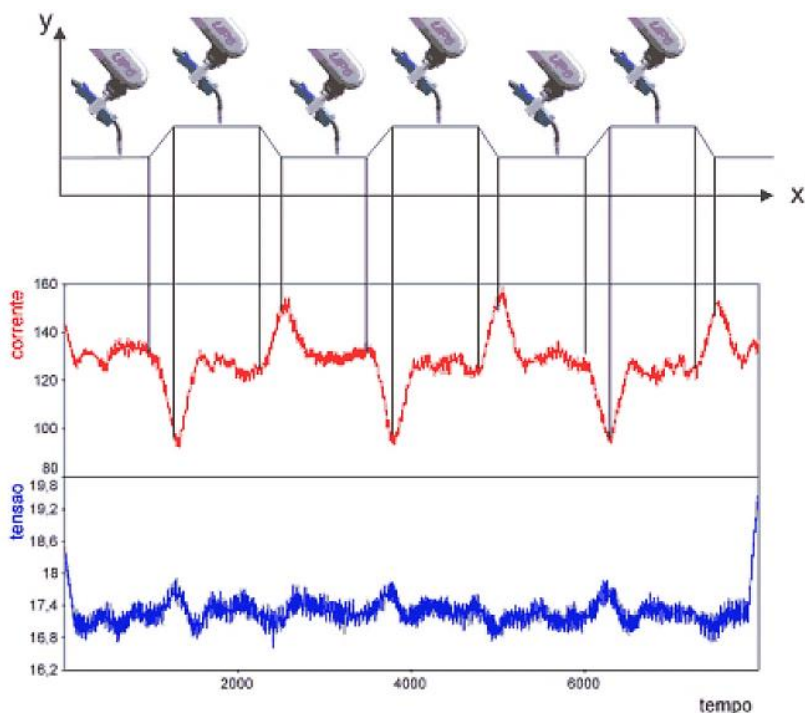


Figura 23 - Comportamento da corrente e tensão médias ao longo das alterações na DBCP em um ensaio robotizado, sincronizado com aquisição de dados de soldagem, simulando as transições de DBCP em uma junta (Silva (2005) [30]).

Durante a realização de soldagem de juntas com oscilação contínua da tocha de soldagem, como apresentada na figura 24, a corrente média acaba apresentando, um formato similar ao da junta (como se “desenhasse” o perfil desta), podendo causar falsas interpretações dos fenômenos presentes. Este fato pode ter sido a causa da forte aceitação, por parte de um grande número de autores, do conceito de variação da resistência elétrica do *stick out* como influência principal na variação elétrica dessas soldagens.

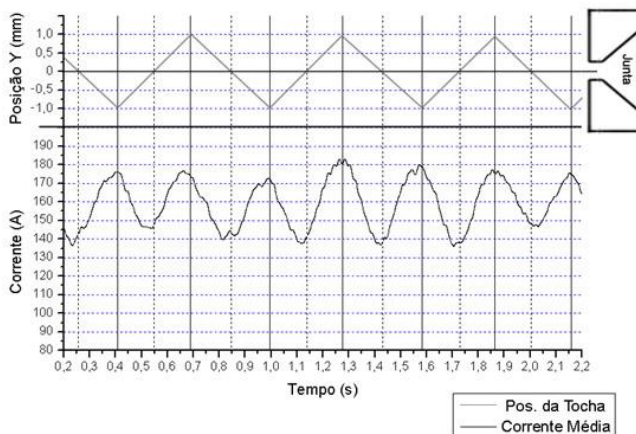


Figura 24 - Exemplo do comportamento da corrente média na soldagem de junta chanfrada, com oscilação contínua da tocha de soldagem.

2.2.2.2 Variação da corrente elétrica da soldagem de juntas devido a mudanças na velocidade com que o arame chega à poça de fusão.

Como foram mencionadas anteriormente, as mudanças na distância entre tocha e peça, na soldagem de juntas, geram mudanças na corrente média da soldagem MIG/MAG convencional. Um dos fenômenos responsáveis por este comportamento está associado à resistência elétrica do *stick out* em função da posição da tocha na junta, o que induz a diferentes valores de corrente. Contudo, foi constatada uma baixa influência desse fenômeno na variação da corrente elétrica, e, constatado também, o fato desta variação elétrica ser fortemente influenciada durante os transientes de DBCP. Assim, é conveniente que haja uma fundamentação do fenômeno mais diretamente ligado à variação elétrica ocorrida nestas soldagens, de modo a possibilitar a automatização destas de maneira eficaz. Neste caso, este trabalho apresentará a variação da velocidade com que o arame chega à poça de fusão, ocorrida durante a transição entre centro e extremos da junta e vice-versa, como influência principal sobre a corrente elétrica, nas soldagens pelo processo MIG/MAG convencional.

Devido ao formato característico das juntas chanfradas, o movimento oscilatório da tocha de soldagem, como citado anteriormente, gera uma mudança contínua na DBCP. Esta mudança, por sua vez, dá-se com intensidade proporcional à inclinação do chanfro e à velocidade com que a tocha de soldagem oscila. Como o arame é

encaminhado à peça com velocidade fixa no processo MIG/MAG convencional, essas variações na DBCP geram diferenças entre a velocidade com que o arame é alimentado pelo tracionador de arame e a velocidade com que o arame chega efetivamente à poça de fusão. Esta relação de velocidades pode ser expressa da seguinte maneira: velocidade com que o arame chega à poça de fusão (V_{ap}) é aproximadamente igual à diferença entre velocidade com que o arame está sendo alimentado (V_a) e variação da distância entre o bico de contato e a peça por unidade de tempo (V_{dbcp} ⁶), conforme a equação 1.

$$V_{ap} = V_a - V_{dbcp} \quad (1)$$

Considerando o fato de a tensão ser fixa na soldagem MIG/MAG convencional, a velocidade com que o arame aproxima-se da poça de fusão influencia diretamente o valor de corrente elétrica no circuito da soldagem. Esta relação entre corrente de soldagem e velocidade com que o arame aproxima-se da poça de fusão pode ser representada pela equação 2, de equilíbrio simplificado entre a velocidade com que o arame é depositado na poça de fusão (V_{ap}) e corrente média (I_m), para o processo MIG/MAG⁷. Deste modo, se, por exemplo, um soldador estiver soldando com o tracionador ajustado em 3 m/min, à 120 A, e começar a se afastar da peça com os mesmos 3 m/min, a velocidade resultante passaria a ser nula e, desta forma, apesar de o arame estar sendo alimentado em 3 m/min, a corrente de soldagem tenderia à zero.

$$V_{ap} = k_{si} * I_m \quad (2)$$

Onde: k_{si} = coeficiente de proporcionalidade entre V_{ap} e I_m .

Assim, tem-se uma variação na corrente média das soldagens de junta, durante a passagem pelos chanfros, gerada pela variação da velocidade de aproximação do arame à poça de fusão. Este fenômeno está exemplificado na figura 25 em que é demonstrado que durante o

⁶ O mais correto seria considerar a variação da distância entre o bico de contato e a poça de fusão por segundo. Entretanto, para efeito de aproximação e simplificação, foi desprezado o comportamento da poça e considerada apenas a geometria original da peça.

⁷ Esta equação é utilizada por alguns autores, por exemplo, no controle sinérgico das variáveis no processo MIG/MAG pulsado [28,31].

afastamento da tocha em relação à lateral da junta (trecho 1), V_{ap} se torna menor do que V_a , gerando, desta forma, uma redução em I_m . A seguir, em 2, quando a tocha passa a movimentar-se na parte central da junta, em que o perfil é idealmente plano (passe inferior, por exemplo), V_{ap} volta a se igualar à V_a , induzindo, desta maneira, o valor inicial de I_m . Por final, em 3, ao se aproximar da lateral da junta, V_{ap} se torna maior do que V_a , induzindo, desta forma, ao aumento de I_m .

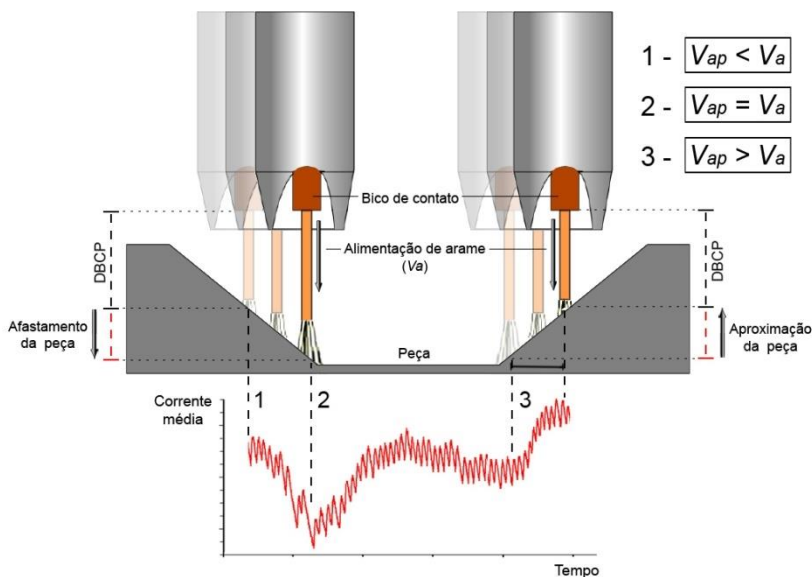


Figura 25 - Variação da velocidade de aproximação do arame à poça (V_{ap}).

2.2.2.3 Comprovação matemática e experimental da diferença de influência dos fenômenos abordados, sobre a corrente elétrica da soldagem

A influência de cada um dos fenômenos abordados, sobre a corrente elétrica na soldagem de juntas pode ser aproximadamente verificada de forma matemática. No caso da variação causada pela resistência elétrica do *stick out*, segundo Jiluan [17], há uma mudança em torno de 1,5 a 2,5% do valor da corrente média da soldagem a cada milímetro variado (soldagem com arame de aço de 1,2 mm de diâmetro). Se, por exemplo, a corrente está em 120 A e a tocha é afastada 1 mm da peça, a corrente de soldagem sofrerá uma redução em

torno de 2,5% (no máximo) de seu valor inicial, ou seja, 3 A, reduzindo-se à 117 A.

Para o caso da variação causada pelas mudanças na velocidade de aproximação do arame à poça de fusão, durante a soldagem de juntas, é possível obter uma aproximação teórica do valor de corrente correspondente a cada condição de *Vap* na junta. Condições estas, que são dependentes da velocidade de oscilação da tocha, inclinação do chanfro e, também, ao trecho em que a tocha desloca-se na junta. O cálculo da corrente correspondente a cada condição de *Vap* pode ser realizado utilizando-se a equação 2.

Sendo assim, uma soldagem com as características apresentadas na tabela 1 e corpo de prova com as dimensões apresentadas na figura 26, na posição vertical ascendente, deverá se comportar eletricamente, de acordo com a matemática proposta anteriormente, da maneira como apresentada na figura 27. Nesta figura, são expostos os comportamentos teóricos para os casos estático e dinâmico em acordo com a posição da tocha na junta, assim como, o resultado prático desta soldagem. Este ensaio foi realizado com aquisição dos dados elétricos da soldagem sincronizados com a mudança de sentido do eixo de tecimento. Foram, ainda, adicionados os instantes aproximados de chegada à lateral, assim como, a passagem pelo centro da junta. Segundo o resultado deste ensaio, foi confirmado o fato de as variações de cunho estático serem mínimas, assim como, o fato de as variações de cunho dinâmico, geradas durante os transientes de DBCP, causarem fortes perturbações à corrente da soldagem, aumentando-a durante a passagem entre centro e lateral da junta e diminuindo-a durante a aproximação ao centro da junta. Pode ser verificado, também, que os picos de corrente média, de certo modo, buscam seus valores correspondentes às novas condições de *Vap*. Entretanto, o valor alcançado dependerá de diversos fatores, dentre estes, os principais (adotados neste trabalho) são a velocidade de resposta da fonte de soldagem e a duração do transiente de DBCP. Neste ensaio, pode ser considerado interessante o fato de a variação negativa no valor da corrente não ser tão abrupta quanto à variação positiva. Uma hipótese para a causa disto pode ser à acomodação e concentração da poça durante os trechos em que a tocha segue apenas o sentido transversal da soldagem. Deste modo, durante o afastamento da lateral da junta, é possível que o material líquido acumulado durante o tempo de parada acabe acompanhando mais excessivamente o arco elétrico; estabilizando, de certa forma, a corrente de soldagem.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem empregados na verificação da variação da corrente elétrica.

Variável	Valor	Unidade
Tensão ajustada	19	V
Velocidade de arame	45	mm/s
Corrente Média	102	A
DBCP (centro da junta)	21,5	mm
Tipo do arame	ER70S-6	-
Diâmetro do arame	1,2	mm
Gás de proteção	75% Ar + 25% CO ₂	-
Velocidade de soldagem	1	mm/s
Frequência de tecimento	0,5	Hz
Tempo de Parada	0,6	S
Amplitude do tecimento	4	mm
Velocidade do eixo Y durante a passagem pelo centro da junta	10	mm/s
V_{dbcp}	17,3	mm/s
k_{si}	0,44	$A^{-1} * mm/s$

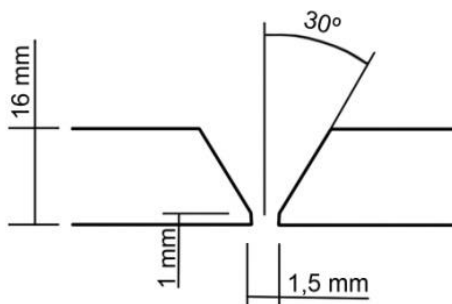


Figura 26 - Dimensões do corpo de prova.

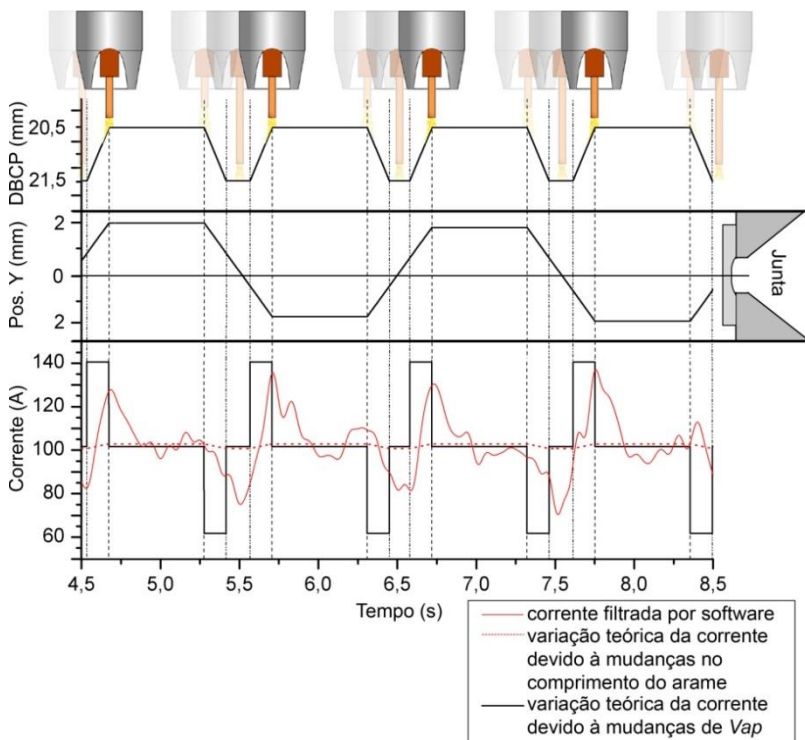


Figura 27 - Comportamento da corrente média em uma soldagem de junta chanfrada em ensaio sincronizado com aquisições de dados elétricos e mudança de sentido do eixo Y (tecimento).

Como expostos anteriormente, os picos de corrente média, de certo modo, buscam seus valores correspondentes às novas condições de *Vap*. Entretanto, o valor alcançado dependerá de diversos fatores, dentre estes, a capacidade de resposta da fonte de soldagem e a duração do transiente de DBCP. Partindo destas considerações, pode ser concluído que, de modo geral, a principal causa da diferença entre os valores de corrente elétrica nas extremidades do movimento de tecimento, ocorrida durante a realização de soldagem de juntas de modo desalinhado é, na verdade, a diferença do tempo de duração dos transientes de DBCP, como é apresentado na figura 28. Ou seja, como o valor de corrente média a ser alcançado no trecho entre centro e extremo da junta é, idealmente, sempre o mesmo, o tempo disponível para a fonte de soldagem chegar ao novo valor de corrente, correspondente à nova condição de *Vap*, será o fator que determinará o valor máximo

alcançado no instante de chegada à extremidade do movimento de tecimento.

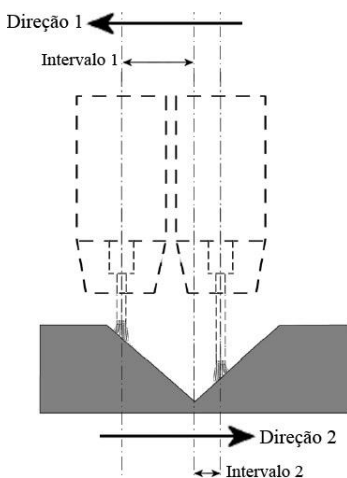


Figura 28 – Diferença presente nos intervalos de tempo em que a tocha desloca-se entre o centro e extremidade da junta quando o conjunto tocha-peça está desalinhado.

A figura 29 apresenta um exemplo do comportamento da corrente média, na soldagem de juntas chanfradas, para os casos da soldagem com a trajetória alinhada e desalinhada, na posição vertical ascendente, com a movimentação do tipo trapezoidal. Nesta figura, similarmente ao que é apresentado na figura 19, é possível ser observada uma maior regularidade nos valores de pico de corrente média (chegada à extremidade da junta) quando o conjunto tocha-peça está alinhado, e menor quando está desalinhado.

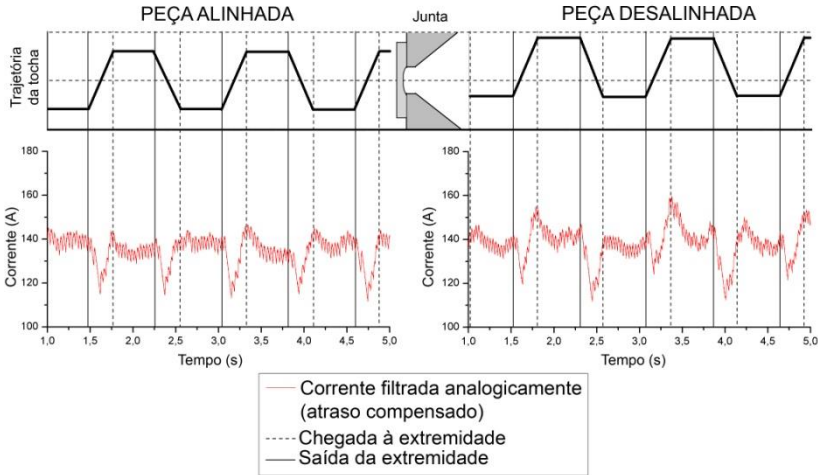


Figura 29 - Comportamento da corrente média do processo MIG/MAG convencional na soldagem de juntas chanfradas com a peça alinhada e desalinhada.

As conclusões obtidas para o processo MIG/MAG convencional sobre V_{ap} e tempo disponível para a fonte de soldagem chegar ao novo valor de corrente terão implicações sobre a associação entre desalinhamento do conjunto tocha/peça e a diferença entre os valores da corrente média alcançados nas extremidades do tecimento (ΔI_m). Se, por exemplo, for considerado o exemplo com a peça desalinhada da figura 29, a diferença ΔI_m correspondente a essa situação é dependente, basicamente, dos seguintes fatores:

- **Velocidade com que o arame é alimentado:** Quanto menor é a velocidade de alimentação do arame, maior é a influência da V_{dbcp} sobre V_{ap} , mais significativa é a mudança de corrente durante os transientes de DBCP, e, conseqüentemente, maior será ΔI_m para um mesmo desalinhamento. Se, por exemplo, o arame fosse, hipoteticamente, alimentado com velocidade infinita, não haveria como ocorrer mudanças no valor de V_{ap} . Deste modo, o valor de ΔI_m seria muito pequeno, correspondente basicamente à diferença de resistência elétrica do *stick out* na extremidade esquerda e direita do tecimento;
- **Velocidade com que a tocha desloca-se de uma lateral à outra da junta:** Esta velocidade influencia diretamente

o valor de Vap e, consequentemente, o valor de corrente que a máquina de solda buscará durante o transiente de DBCP da junta. Assim, quanto mais rápido for o deslocamento lateral da tocha, maior será o valor de ΔIm para um mesmo desalinhamento. Sendo que, essa velocidade é dependente da amplitude, frequência e tempo de parada do tecimento;

- **Ângulo do chanfro:** Quanto mais fechado for o chanfro, maior será a variação de $Vdbcp$, de Vap e, consequentemente, o valor de ΔIm ;
- **Velocidade de resposta da fonte de soldagem à mudanças em Vap :** Quanto mais rápida for a resposta da fonte à uma mudança em degrau de Vap , mais próxima do valor de corrente correspondente ao novo Vap a corrente chegará. Se fosse utilizada, hipoteticamente, uma fonte com resposta ideal, os valores médios de corrente nos extremos do tecimento seriam aproximadamente os mesmos; diferenciando-se, basicamente, devido à mudança na resistência elétrica do *stick out*;
- **Velocidade de soldagem:** Quanto mais lento o avanço da tocha, maior será o acúmulo de material líquido e, consequentemente, menor será a influência do formato da junta sobre a soldagem. Desta forma, a variação da corrente de soldagem e, consequentemente, o valor de ΔIm também serão reduzidos.

Assim, para que um dispositivo automatizado possa controlar com eficácia a trajetória destas soldagens, é necessária a devida consideração para com as implicações mencionadas acima.

2.3 FUNCIONAMENTO DO SEGUIMENTO DE JUNTA DO TARTÍLOPE V2F

Como constatado no capítulo 1.1.3.3, a funcionalidade de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F não funciona em soldagens fora de posição. Assim, para que seja possibilitado, de alguma maneira, o objetivo desse trabalho - a utilização do seguimento de junta do equipamento referido, em soldagens fora de posição - são convenientes que sejam, primeiramente, estudadas suas partes funcionais. Essas partes

foram separadas em condicionamento do sinal, interpretação da posição da tocha na junta e reposicionamento da tocha.

2.3.1.1 Condicionamento do sinal

Como abordado no capítulo 2.2.1, quando o sensoriamento da posição da tocha de soldagem é realizado por intermédio da corrente, é necessária a conformação desta em valor médio. No caso do TARTÍLOPE V2, este processo é realizado analogicamente, por meio de um circuito RC. Este circuito é esquematizado na figura 30 e é composto por um resistor de $47\text{ k}\Omega$, em série com o sinal da corrente (provindo de um sensor hall), e um capacitor eletrolítico de $2,2\text{ }\mu\text{f}$, em paralelo com o sinal de corrente e o resistor, resultando em um filtro passa-baixa com frequência de corte de $1,54\text{ Hz}$. Um exemplo do comportamento deste filtro também é apresentado na figura 20, na página 43, e outro na figura 29, na página 54. Este filtro apresenta um atraso de aproximadamente quarenta milissegundos. A figura 31 apresenta um exemplo do efeito deste atraso no sinal de corrente média. Nessa figura está exposto o resultado de um ensaio com aquisição sincronizada da mudança de sentido do movimento de tecimento, com a corrente de soldagem filtrada e o respectivo atraso gerado pelo circuito de filtragem.

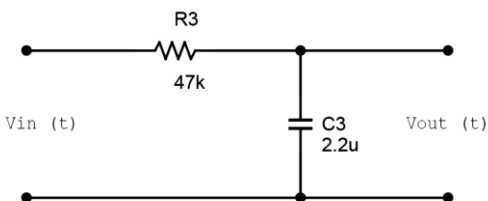


Figura 30 - Filtro passa-baixa com frequência de corte de $1,54\text{ Hz}$ (Broering (2005) [5]).

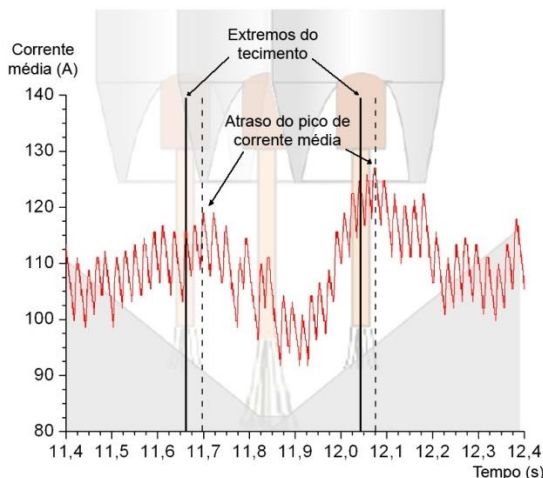


Figura 31 - Atraso gerado pela filtragem do sinal de corrente da soldagem.

2.3.1.2 Interpretação da posição da tocha de soldagem na junta

O manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2 realiza a interpretação da posição da tocha de soldagem na junta por meio da subtração entre os valores de corrente média adquiridos nos instantes de chegada da tocha às extremidades do movimento de tecimento (ΔIm). Esta chegada da tocha representa o instante em que, idealmente, aconteceria o valor máximo de corrente média (pico). Entretanto, o atraso citado anteriormente implica a ocorrência tardia do pico de corrente média em relação a real chegada da tocha a alguma extremidade. Logo, esses valores de ΔIm obtidos acabam não representando fielmente a condição da soldagem, podendo estar atenuados, acentuados e/ou, em alguns casos, apresentar sinal contrário à obtenção considerando-se o atraso. Portanto, a não compensação do atraso pode ser considerada um fator prejudicial ao funcionamento regular de sistemas de seguimento de junta com sensoriamento a arco, principalmente quando são envolvidos valores altos de frequências de tecimento.

2.3.1.3 Reposicionamento da tocha de soldagem na junta

Uma vez obtido um valor de ΔIm , o sistema realiza uma conversão, transformando a diferença de corrente em deslocamento

(mm) para o eixo Y. Este valor obtido em milímetro será correspondente à distância entre ponto médio do tecimento e centro da junta. Deste modo, a partir desta obtenção, é iniciada a etapa de reposicionamento da tocha de soldagem na junta.

A conversão do valor obtido de ΔIm para milímetros se dá pela multiplicação deste pela constante “K”, que na versão precedente a este trabalho é definida em 0,0349 mm/A. Nesse caso, como mostra o fluxograma da figura 32, a realização do reposicionamento automático da tocha na junta acontece da seguinte maneira: primeiramente o sistema verifica se os valores de corrente média nos instantes de chegada às extremidades da junta são iguais (1). Em seguida, a partir da constatação de uma diferença entre estes, é obtido o valor de correção necessário por meio da multiplicação desta diferença pela constante “K” (2). Na sequência, o sistema verifica se o valor da correção está entre 0,2 e 1,0 mm (3)⁸ e, se estiver, desloca a trajetória programada com o valor obtido no cálculo da correção (4); se não estiver, o sistema não atua com correções.

⁸ Segundo Costa (2003), esses limites possuem o intuito de evitar que o sistema efetue correções muito grandes ou muito pequenas, as quais não podem ser atribuídas ao erro de alinhamento do conjunto tocha-peça, mas, sim, à flutuação do sinal da corrente média [13].

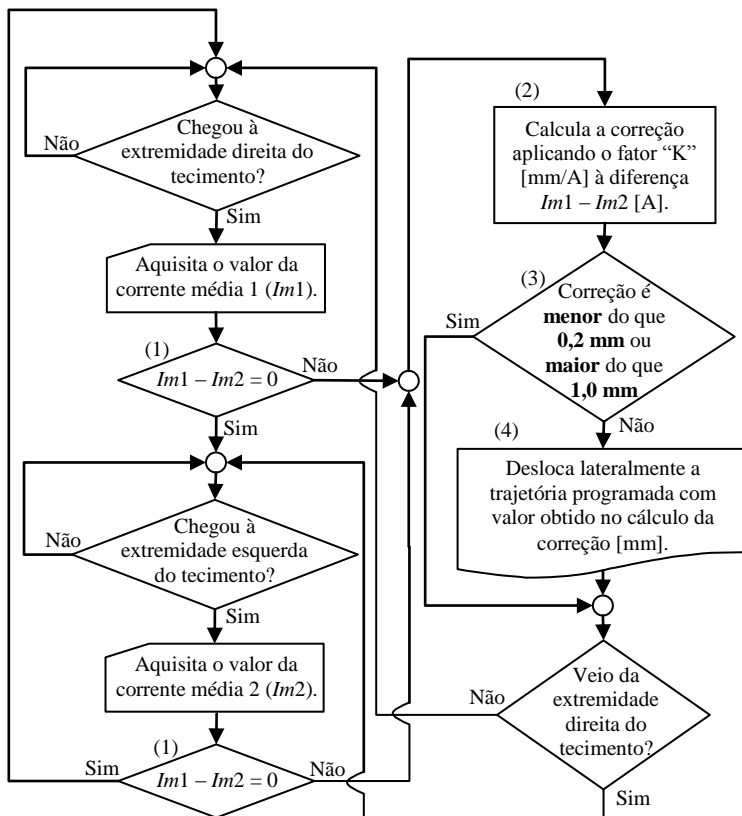


Figura 32 - Fluxograma do funcionamento da correção automática de trajetória da tocha de soldagem do manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2 [13].

Considerando a função de reposicionamento automático da tocha na junta, embutida no manipulador TARTÍLOPE V2, tem-se que sua lógica de controle pode ser caracterizada como do tipo “proporcional”, uma vez que o valor de correção é calculado proporcionalmente ao valor ΔIm interpretado, porém, com a adição de uma espécie de histerese, também conhecida como zona-morta. A figura 33 representa o comportamento desta ação de controle, expondo que quanto maior for o erro (ΔIm), maior será o valor de correção resultante. Além do mais, é exposto que esta ação de controle ocorre somente se o deslocamento necessário estiver dentro de uma faixa pré-estabelecida (zona-morta).

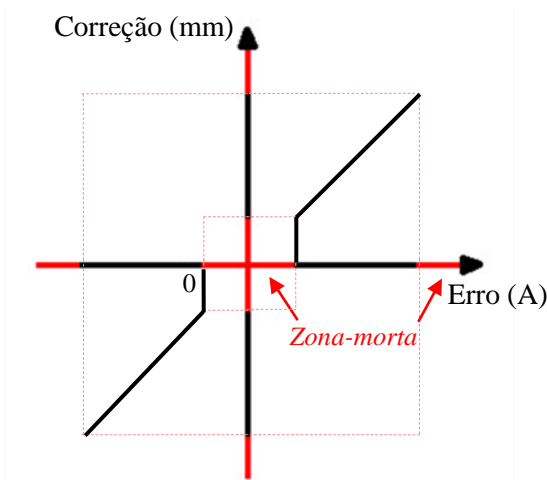


Figura 33 – Comportamento da ação de controle utilizada pelo manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2.

2.4 FUNCIONAMENTO DO SEGUIMENTO DE JUNTA DE UMA FERRAMENTA COMERCIAL, MOTOMAN COMARCIH

Produtos disponíveis no mercado participam do desenvolvimento de diversos tipos de novos produtos. Eles podem vir a cumprir, por exemplo, um papel de “bússola”, guiando os desenvolvedores nas escolhas de tecnologias que serão utilizadas. Outro papel que eles podem vir a cumprir é o de “elemento validador”. Neste caso, a eficiência e a eficácia das funcionalidades de algum sistema comercial e de um produto em desenvolvimento são confrontadas, de modo a validar, por exemplo, a utilização de um tipo diferente de tecnologia.

Neste trabalho, a utilização e o comportamento em algumas aplicações do manipulador em estudo, TARTÍLOPE V2F, foi comparado ao de uma ferramenta comercial, de princípio de funcionamento semelhante. Esta ferramenta denomina-se COMARCIH e é fabricada pela empresa MOTOMAN. Esta empresa é a filial americana da YASKAWA (Japão), uma das maiores fabricantes mundiais de robôs, com mais de 230.000 instalados pelo mundo [32]. A ferramenta COMARCIH é a solução para correção automática de trajetória utilizando o arco elétrico como sensor, desenvolvida por essa empresa, e foi utilizada, neste trabalho, juntamente com um robô MOTOMAN UP6, ambos apresentados na figura 34. A seguir, é tratado

o funcionamento dessa solução comercial, sendo abordada sua lógica de controle de trajetória, assim como, as rotinas necessárias para sua correta utilização.



Figura 34 – Gabinete COMARCIII e robô MOTOMAN UP6.

2.4.1 Interpretação da posição da tocha de soldagem

A ferramenta de correção automática COMARCIII interpreta a posição da tocha em relação à junta, assim como o manipulador TARTÍLOPE V2, por meio da análise dos picos da corrente média gerados pela transição entre centro e lateral da junta. Como já abordado, estes picos acontecem instantes depois de a tocha chegar à extremidade do movimento de tecimento e isto é devido ao atraso intrínseco do processo de filtragem. No caso do COMARCIII, este atraso é compensado pelo sistema a partir de um valor definido pelo usuário, denominado *Phase Compensation Value*.

Para atribuir um valor correto à *Phase Compensation Value*, o usuário tem disponível uma rotina de calibração. Nesta calibração o sistema verifica, a partir da soldagem de uma peça alinhada, os instantes em que estão acontecendo os picos de corrente média. A figura 35 apresenta um exemplo da tela gerada pelo sistema durante esse procedimento, na qual é informado o parâmetro que deve ser ajustado (correspondente à frequência de tecimento utilizada) e o valor a ser

atribuído a este, e apresenta, também, um exemplo da lista de parâmetros alteráveis, disponíveis pelo sistema.



Figura 35 – Tela de calibração da compensação de fase e definição dos parâmetros do COMARCIII em um robô MOTOMAN UP6.

A filtragem do sinal de corrente, diferentemente do TARTÍLOPE V2, dá-se digitalmente. Este fato pode ser um dos motivos que levaram a MOTOMAN à opção de calibração do atraso do sinal de corrente média. Isto porque alguns tipos de filtros digitais podem apresentar atrasos significativos. Além do mais, este tipo de filtragem, independentemente do algoritmo utilizado, apresenta facilidades na mudança do fator de amortecimento, possibilitando a utilização de diferentes fatores – consequentemente, diferentes atrasos - em acordo com a frequência do tecimento utilizada.

Uma vez realizada a calibração, o sistema irá comparar o valor de corrente aquisitado nos instantes programados e, a partir do resultado, passará para a etapa de reposicionamento da tocha de soldagem na junta.

2.4.2 Reposicionamento da tocha de soldagem

Como foi exposta, a ferramenta COMARCIII executa a rotina de reposicionamento da tocha de soldagem na junta a partir da diferença obtida entre os valores (picos) de corrente média aquisitados (ΔIm). Esta rotina de reposicionamento se dá da seguinte maneira:

- Se ΔIm for maior do que a soma entre o valor desejado (tipicamente zero) e um valor de tolerância (histerese), o sistema corrige negativamente, com uma distância de correção fixa.

- Se ΔI_m for menor do que a subtração entre o valor desejado e o valor de histerese, o sistema corrige positivamente, com uma distância de correção fixa.

A histerese mencionada é denominada pela MOTOMAN como “*Dead Zone*”, a distância de correção fixa é denominada “*Correction Amount*”, e ambas são definidas na tela de parâmetros (figura 35). No caso do *Correction Amount*, há, basicamente, cinco parâmetros associados e cada um destes é correspondente a uma faixa de frequência de tecimento (menor que 2 Hz, de 2 à 3 Hz, de 3 à 4 Hz e maior que 4 Hz).

A realização de correção na trajetória do COMARCIH pode ser descrita, mais especificamente, segundo o fluxograma apresentado na figura 36, estabelecido a partir das informações contidas em seu manual de instruções. De acordo com esse fluxograma, inicialmente o controlador aguarda a chegada às extremidades do tecimento. Uma vez constatada a chegada (1), o sistema inicia uma contagem, segundo o tempo definido na variável *Phase Compensation Value* [ms] (2), e, em seguida, realiza a aquisição de valor da corrente (3). No próximo passo, é estabelecida a diferença entre este e o último valor aquisitado (valor anterior, correspondente à outra extremidade do tecimento). Caso esta diferença não esteja contida na faixa de valores que abrangem a *Dead Zone* [A] (4), o sistema executa a correção da trajetória via a variável *Correction Amount* [μm] (5).

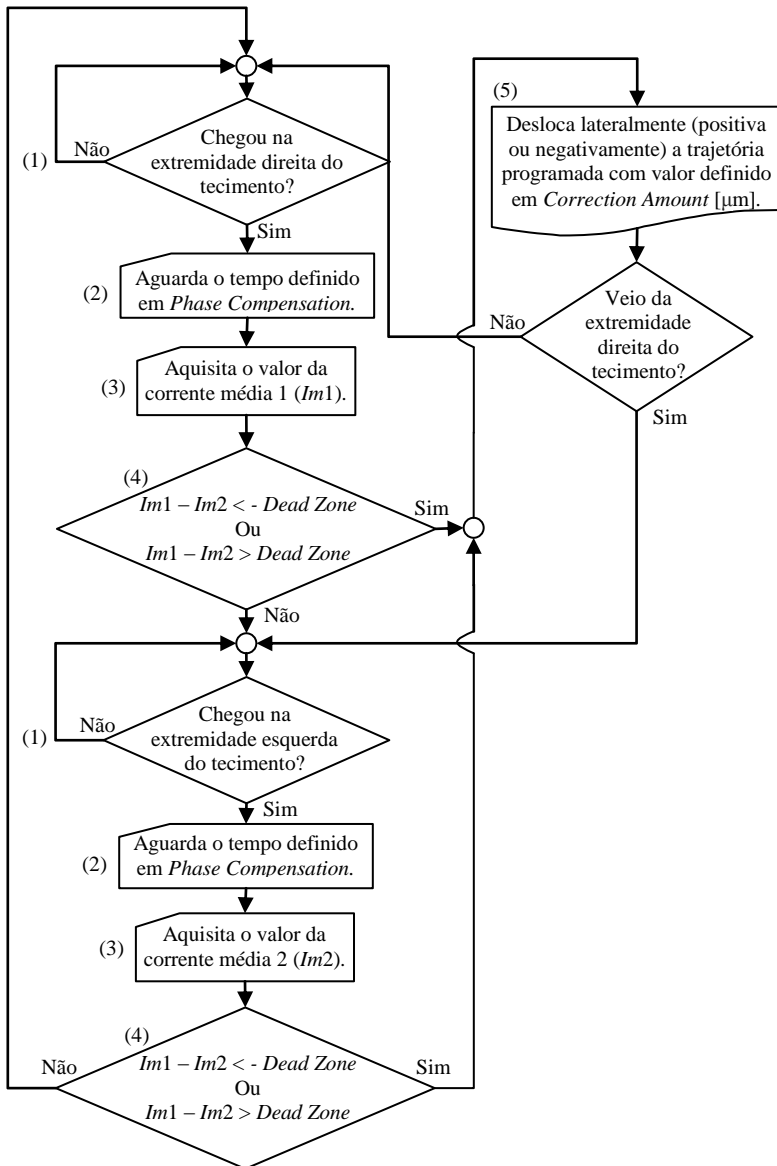


Figura 36 – Fluxograma de funcionamento da ferramenta COMARCIII para correção automática de trajetória.

Esta lógica utilizada pela MOTOMAN na realização de correções na trajetória (reposicionamento da tocha de soldagem) é baseada em uma das mais simples ações de controle, conhecida como “*liga-desliga com histerese*”, comumente empregada no controle de sistemas de ar-condicionado. Uma vez que a MOTOMAN denomina a histerese total como “*Dead Zone*” e o valor de correção como “*Correction Amount*”, sua ação de controle pode ser expressa como na figura 37. Nesta figura é exposto que, como abordado anteriormente, o sistema da MOTOMAN atua com correções no posicionamento da tocha segundo a distância ajustada na variável “*Correction Amount*”, toda vez que o valor de erro (ΔIm) não estiver contido na “*Dead Zone*”.

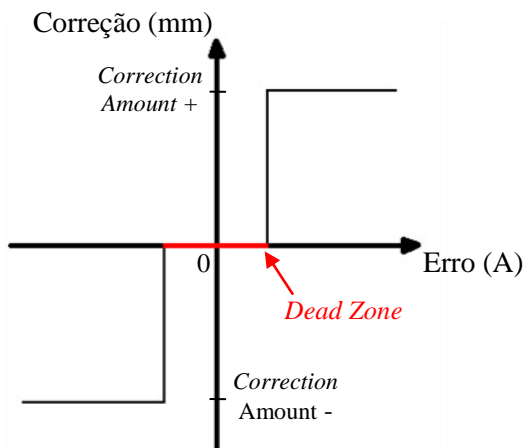


Figura 37 – Comportamento da ação de controle utilizada pela MOTOMAN.

3 SOLDAGEM FORA DE POSIÇÃO COM SEGUIMENTO AUTOMÁTICO DA JUNTA E SENSORIAMENTO VIA ARCO ELÉTRICO, POR MEIO DE UMA SOLUÇÃO COMERCIAL

O ensaio realizado com o TARTÍLOPE V2F mostrou que o sistema não está apto à realização da soldagem fora de posição, de união de chapas de aço, com seguimento automático de junta a arco. Desta maneira, foi estudada a realização destas soldagens por meio de uma solução comercial, de modo a validar a real possibilidade de utilização do arco elétrico como sensor nestas aplicações.

A partir do resultado da soldagem com o equipamento comercial, diferentes caminhos poderiam vir a serem tomados para conclusão do trabalho. Se a solução comercial também não fosse capaz de realizar a soldagem fora de posição com seguimento automático de junta, poderia ser um sinal de que as soldagens verticais apresentam fenômenos que inviabilizam ou dificultam seriamente a realização de sensoriamento da posição da tocha na junta via arco. Neste caso, o estudo haveria de ser direcionado, basicamente, à constatação e comprovação da impossibilidade ou extrema dificuldade de realização destas operações. No entanto, se um resultado positivo fosse obtido nessa soldagem, seria implicada a necessidade de melhorias na funcionalidade de seguimento de junta do manipulador TARTÍLOPE V2F. Logo, neste outro caso, o estudo haveria de tomar outro rumo, passando a ser direcionado à influência das partes desta funcionalidade sobre esse tipo de soldagem, possibilitando ou propiciando, desta forma, a obtenção de uma solução nacional para este problema de automatização.

A seguir, então, serão tratados o aparato experimental e a metodologia empregada no estudo da soldagem envolvendo a solução comercial, robô MOTOMAN UP6 equipado com o gabinete COMARCIIL, na realização da soldagem descrita anteriormente.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

Foi utilizada, assim como no caso do TARTÍLOPE V2F, no capítulo 1.1.3, a estrutura do LABSOLDA/UFSC para a realização dos ensaios envolvendo a ferramenta comercial da MOTOMAN na soldagem vertical com correção automática de trajetória da tocha mediante o sensoriamento da corrente de soldagem. A fonte de soldagem utilizada também foi a mesma, uma IMC INVERSAL 300. O sistema de movimentação utilizado é um robô MOTOMAN UP6, de seis

eixos, equipado com o gabinete de correção de trajetória COMARCIIL, ambos apresentados anteriormente na figura 34.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia dos ensaios com o robô MOTOMAN seguiu o modelo daquela empregada na soldagem com o TARTÍLOPE V2F. Foram mantidas as dimensões dos corpos de prova (figura 9) e o ângulo de desalinhamento também permaneceu o mesmo, 15° entre a linha central da junta e a trajetória programada de soldagem.

Foi necessário programar o robô com valores diferentes daqueles apresentados na tabela 1. Isto foi devido, primeiramente, a uma falha no controlador do robô MOTOMAN, com relação à frequência de tecimento ($Freq_{tec}$). Esta falha acontece porque o controlador XRC⁹ do robô UP6 não inclui os tempos gastos com as paradas nas laterais, no estabelecimento da frequência desejada (número de ciclos de tecimento por segundo). Consequentemente, a duração dos ciclos de tecimento acaba sendo menor do que a desejada, igual à soma entre o período correspondente à frequência programada ($Freq_{prog}$) e os tempos de parada nas laterais. Assim, a frequência programada deve ter seu valor atribuído segundo a equação 3, para que o robô movimente-se da maneira correta.

$$Freq_{prog} = Freq_{tec} + \frac{1}{tp_{esq}} + \frac{1}{tp_{dir}} \quad (3)$$

Onde: $Freq_{prog}$ = frequência programada no robô MOTOMAN (Hz);

$Freq_{tec}$ = número desejado de ciclos de tecimento por segundo;

tp_{esq} = tempo de parada na extremidade esquerda (s);

tp_{dir} = tempo de parada na extremidade direita (s).

Outro fator que exigiu mudanças na regulação dos passes é relacionado à amplitude do tecimento. A MOTOMAN define como amplitude a distância entre linha central do tecimento e extremidade do tecimento, similarmente à definição de amplitude em fenômenos

⁹ O mesmo acontece com o controlador DX100, utilizados nos modelos de robôs mais recentes como HP20 e SIA10D, também disponíveis no LABSOLDA/UFSC.

ondulatórios. No caso do TARTÍLOPE, o termo amplitude refere-se à distância total entre extremidades do tecimento. Deste modo, o valor ajustado no robô deve corresponder à metade daquele ajustado no TARTÍLOPE. Além do mais, o robô não cumpre a distância total programada na amplitude. Assim, a amplitude ajustada no robô acabou sendo um pouco maior do que a metade do valor utilizado no TARTÍLOPE. A tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros de movimentação utilizados no robô MOTOMAN. A fonte de soldagem e o gás de proteção permaneceram os mesmos que no ensaio com o TARTÍLOPE V2F.

Tabela 3 – Programação usada no robô para se ter as mesmas condições de movimentação da tabela 1.

Passe	Velocidade de soldagem	Amplitude do tecimento (<i>Weaving amplitude</i>)	Frequência do tecimento (<i>Weaving frequency</i>)	Tempos de parada (<i>weav stop</i>)
1	1 mm/s	2 mm	1,3 Hz	0,5/0,5 s
2	0,9 mm/s	4,5 mm	1,2 Hz	0,5/0,5 s
3	0,8 mm/s	6,5 mm	1,1 Hz	0,4/0,4 s

3.2.1 Calibração do COMARCI

Como foi abordada anteriormente (capítulo 2.4.1), a calibração do tempo de atraso do sinal de corrente média, denominada *Phase Compensation Value*, é exigida para cada frequência de tecimento utilizada no procedimento de soldagem, de modo a possibilitar o correto funcionamento da correção automática de trajetória do robô MOTOMAN equipado com o gabinete COMARCI.

O manual de funções do COMARCI [29] não aborda a capacidade de repetitividade desta ferramenta em obter os valores nas medições. Assim, foi utilizada a média dos valores de uma amostra de quatro aquisições como valor definitivo da calibração para cada passe. Para tanto, foi definida a seguinte estratégia na realização da calibração do *Phase Compensation Value*:

1. Em um corpo de prova posicionado verticalmente é definida uma trajetória de soldagem em que o alinhamento com a peça seja o mais correto possível;

2. A trajetória estabelecida é dividida em quatro seguimentos, de modo a possibilitar a realização de quatro cordões de solda independentes;
3. Cada passe é, então, executado e após a soldagem de cada um dos quatro trechos dos passes, é registrado o valor de *Phase Compensation Value* gerado pelo robô;
4. Finalmente, é definido o valor de *Phase Compensation* a partir da média dos quatro valores obtidos em cada passe.

Os resultados das soldagens e os valores obtidos no ensaio de calibração do robô UP6 estão apresentados na figura 38 e na tabela 4, respectivamente. Além dos valores de atraso, estão apresentados na tabela, também, os valores de corrente média e diferença média de corrente resultantes em cada trecho. Estes valores são exibidos de maneira similar aos valores de *Phase Compensation* e estão relacionados com a DBCP (corrente média total), e com o alinhamento entre linha central do tecimento e peça (diferença média entre as correntes médias nas laterais).

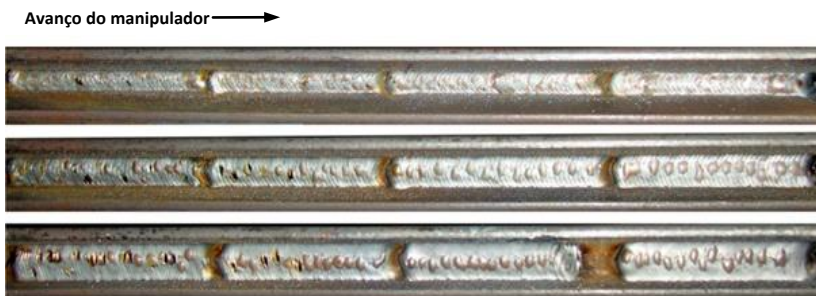


Figura 38 - Resultado das soldagens de calibração do robô (sequência de realização dos cordões: esquerda para direita e cima para baixo).

Tabela 4 – Valores obtidos de *Phase Compensation*, corrente média total, e diferença média de corrente média nas laterais da junta.

Passe	Trecho	<i>Phase Compensation Value</i>	Corrente Média	Diferença Lateral
1	1	108 ms	110 A	3,1 A
	2	596 ms	110 A	0 A
	3	590 ms	107 A	0 A
	4	402 ms	105 A	-2,9 A
2	1	709 ms	115 A	1 A
	2	767 ms	113 A	4,8 A
	3	675 ms	113 A	0,5 A
	4	857 ms	111 A	0,9 A
3	1	621 ms	120 A	-0,2 A
	2	746 ms	119 A	1,1 A
	3	83 ms	132 A	8,3 A
	4	43 ms	118 A	2,1 A

Como pode ser observado na tabela 4, alguns cordões apresentaram valores muito discrepantes, dificultando a definição do valor ideal. Considerando isto, foram descartados os trechos que, por motivo de inclinação inadequada do tecimento, ou desalinhamento da linha central do tecimento com a junta, por exemplo, apresentaram valores de diferença de corrente média nas laterais da junta maiores que 1,5 A. Desta maneira, a média dos valores de calibração passa a ser calculada conforme a tabela 5, em que é possível ser observada uma maior regularidade nos valores restantes.

Tabela 5 – Valores de tempo entre centro e lateral da junta, *Phase Compensation Value*, corrente média total, diferença média de corrente média nas laterais da junta e *Phase Compensation Value* resultante.

Passo	Trecho	<i>Phase Compensation Value</i>	Corrente Média	Diferença Lateral	<i>Phase Compensation Value Resultante</i>
1	1	108 ms	110 A	3,1 A	(596+590)/2 = 593 ms
	2	596 ms	110 A	0 A	
	3	590 ms	107 A	0 A	
	4	402 ms	105 A	-2,9 A	
2	1	709 ms	115 A	1 A	(709+675+857)/3 = 747 ms
	2	767 ms	113 A	4,8 A	
	3	675 ms	113 A	0,5 A	
	4	857 ms	111 A	0,9 A	
3	1	621 ms	120 A	-0,2 A	(621+746)/2 = 683 ms
	2	746 ms	119 A	1,1 A	
	3	83 ms	132 A	8,3 A	
	4	43 ms	118 A	2,1 A	

Após ajustados os instantes de aquisição de corrente média, o sistema da MOTOMAN torna-se capaz de verificar a ocorrência de desalinhamento entre linha central do tecimento e centro da junta. Assim, se for ocorrido algum desalinhamento, resta, ao sistema, a realização das devidas correções na trajetória de movimentação.

3.2.2 Definição do valor da correção (*Correction Amount*)

A correção realizada pelo sistema da MOTOMAN é executada com valores fixos. Ou seja, ao ser verificada a ocorrência de erro no alinhamento, o sistema passa a incrementar lateralmente a trajetória, com um valor de acréscimo fixo (*Correction Amount*), até que o erro esteja em uma faixa de valores toleráveis. Assim, para atender as condições impostas neste trabalho, o sistema teve de ter o valor de *Correction Amount* ajustado de modo a tornar possível, em todos os passes, o seguimento do centro da junta de uma peça desalinhada em 15° em relação à trajetória programada.

Para a definição, propriamente dita, do valor ideal de *Correction Amount*, foi estabelecida a equação 4. Nesta equação, o afastamento aproximado, necessário a cada correção é obtido por uma relação entre velocidade de avanço programada, frequência de tecimento e ângulo de inclinação da peça. Como a peça é inclinada 15° da trajetória programada, o sistema deve ser capaz de deslocar-se lateralmente com

velocidade 25,8% (seno de 15°) menor do que a velocidade de avanço. Considerando o fato de o incremento lateral acontecer uma vez por ciclo de tecimento, tem-se que o valor de incremento (*Correction Amount*) necessário para o cumprimento da velocidade lateral desejada é aproximadamente igual a 25,8% da velocidade de avanço programada, dividido pela frequência de tecimento e, em seguida, multiplicado por mil, para conversão de unidade.

$$Correction\ Amount = 1000 \times \frac{Vel_{Avanço} \times \sin(15^\circ)}{Freq_{Tec}} \quad (4)$$

Onde: $Vel_{Avanço}$ = Velocidade de avanço programada (mm/s).

$Freq_{Tec}$ = ciclos de tecimento por segundo (Hz).

Correction Amount = Incremento lateral da posição da tocha (μm).

Uma vez estabelecida a equação de definição do valor de *Correction Amount*, passou-se para a definição do valor ideal deste para cada passe utilizado na soldagem, conforme a tabela 6.

Tabela 6 – Valores de *Correction Amount* calculados para cada passe.

Passe	<i>Correction Amount</i> (μm)
1	457
2	427
3	332

Devido ao fato de as frequências de tecimento utilizadas em todos os passes estarem dentro da mesma faixa de frequência associada ao parâmetro que vai ser ajustado com o valor de *Correction Amount*, é necessário a utilização de um único valor que seja suficientemente grande, capaz de atender todos os passes no cumprimento dos 15° de desalinhamento. Assim, o valor de *Correction Amount* do robô foi passado de 150 μm (valor padrão) para o valor calculado para o primeiro passe, ou seja, 457 μm .

Definido o valor de *Correction Amount*, passou-se para o ajuste de *Dead Zone* (histerese), a última definição necessária na operação do sistema da MOTOMAN em soldagens com seguimento de junta.

3.2.3 Definição do valor de histerese (*Dead Zone*)

Como mencionado anteriormente (capítulo 2.4.2), o sistema de correção de trajetória da MOTOMAN funciona seguindo a lógica de controle “*liga-desliga com histerese*”. A adição da histerese é necessária devido à instabilidade intrínseca deste tipo de ação de controle. Esta instabilidade acontece principalmente nas situações em que a distância de correção programada (*Correction Amount*) é maior do que a distância necessária para o realinhamento. Desta maneira, como é exemplificado na figura 39, na tentativa de corrigir este pequeno erro, o sistema ultrapassa a linha central da junta, gerando um erro de sentido contrário ao anterior, apresentando, desta forma, um comportamento oscilatório.

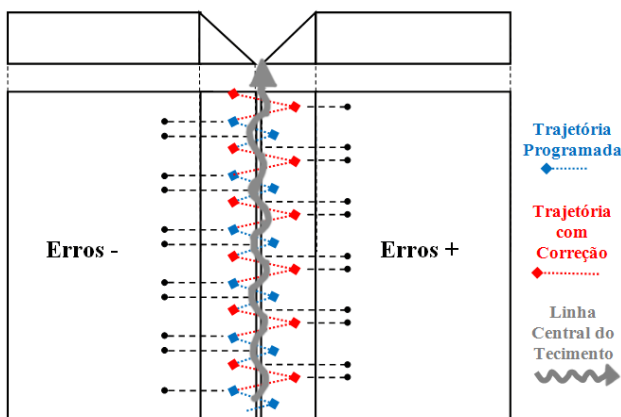


Figura 39 – Ilustração do comportamento da ação de controle “*liga-desliga*” sem adição de histerese na soldagem de juntas.

O manual de operação do COMARCIII [29] não aborda nenhum procedimento que possibilite o ajuste de *Dead Zone*. Assim, foi estabelecida uma estratégia com base nos valores de diferença média de corrente média nas laterais da junta, aquisitados durante a calibração do *Phase Compensation Value*. Esta estratégia se deu da seguinte maneira: como os cordões realizados nos ensaios de calibração apresentaram-se visualmente bem dispostos na junta - com exceção do terceiro trecho do quarto passe - foi utilizada a média dos módulos dos maiores valores de diferença de corrente média resultantes de cada passe como valor de *Dead Zone*. Deste modo, o valor de *Dead Zone* sofreu uma pequena alteração, passando de 5 A (padrão do robô) para 6 A.

3.2.4 Resultado da soldagem vertical com seguimento de junta por meio de uma solução comercial

Com o sistema da MOTOMAN calibrado, resta a realização da soldagem vertical ascendente com a peça inclinada, para possível validação do uso do arco elétrico como sensor de posição nestas soldagens. Desta forma, o robô foi programado com uma trajetória vertical enquanto a peça foi posicionada 15° em relação a esta trajetória. Em seguida, foram realizados os três passes partindo-se do mesmo ponto inicial. O resultado desta soldagem com correção de trajetória é apresentado na figura 40 e valida a possibilidade de utilização do arco elétrico como sensor de trajetória nestas, uma vez que o robô seguiu a junta e os cordões apresentaram-se com aspecto satisfatório. Uma observação que deve ser ressaltada é que o comportamento desse sistema de seguimento de junta em ângulos diferentes do utilizado apresentará, necessariamente, resultados diferentes do alcançado, uma vez que o sistema foi configurado a partir do ângulo arbitrado de 15° .

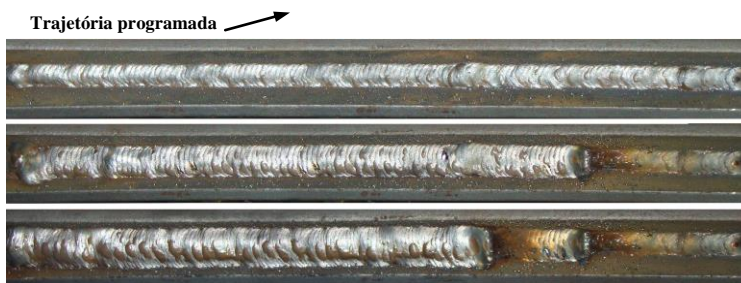


Figura 40 - Resultado da soldagem com a peça desalinhada em 15° em relação à trajetória programada, utilizando o sistema MOTOMAN COMARCIIL.

4 MUDANÇAS NA FUNCIONALIDADE DE SEGUIMENTO DE JUNTA DO MANIPULADOR TARTÍLOPE V2F

Uma vez constatada a possibilidade de emprego de seguimento de junta com sensoramento via arco na soldagem vertical ascendente, foi retomado o estudo da funcionalidade de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F em relação à soldagem fora de posição, partindo-se da mesma metodologia apresentada no capítulo 1.1.3.

Foi constatado no capítulo 1.1.3.3 o não funcionamento do seguimento de junta na posição vertical ascendente. Para facilitar a determinação da causa desse não funcionamento, foi adicionada ao programa do TARTÍLOPE uma função de salvamento dos valores de erro obtidos (diferenças de corrente média), assim como, a correção resultante de cada diferença. Em seguida, foi repetido o primeiro teste – no qual foi apresentado o mesmo resultado - e gerado um gráfico com os valores obtidos. Estes valores obtidos estão expostos no gráfico da figura 41, em que é possível ser observado que os erros são tão altos que as correções resultantes acabam ultrapassando o limite de 1 mm presente no programa, e, deste modo, o sistema ignora as correções (correção igual à zero). Como este limite é atingido desde o início da soldagem, o erro acaba aumentando continuamente, implicando mais correções acima de 1 mm. Ou seja, com este limite, para essa situação, o sistema não executa correções na trajetória da soldagem.

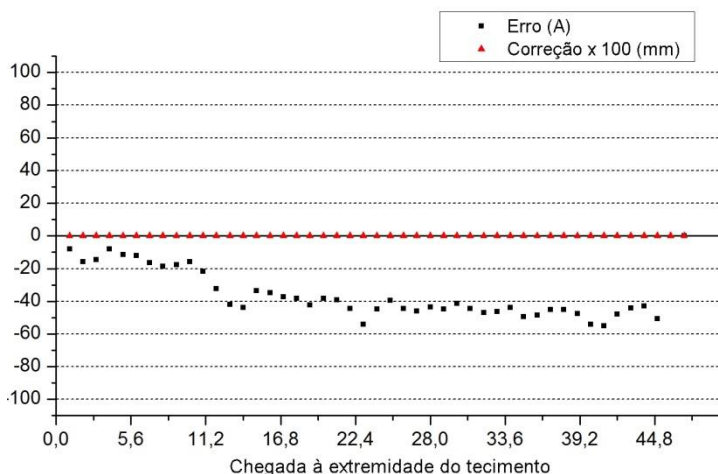


Figura 41 – Gráfico dos valores de diferença de corrente média aquisitados e as correções relativas a cada diferença, obtidas com o algoritmo inicial.

4.1.1 Algoritmo II (1ª modificação)

A partir dos resultados obtidos com o algoritmo original do TARTÍLOPE V2F, foi realizada uma modificação na lógica de funcionamento do limite superior de correção. Esta modificação se deu da seguinte maneira: ao invés de ignorar as correções que ultrapassam 1 mm, o sistema passa a limitá-las à 1 mm. Ou seja, quando o valor de correção resultante for maior do que 1 mm, o sistema irá deslocar a trajetória da tocha em apenas 1 mm. O resultado obtido a partir desta lógica é apresentado na figura 42. Neste resultado, primeiramente, é constatado o seguimento da junta por parte do TARTÍLOPE, o que pode ser considerado interessante, considerando que o equipamento, até então, não respondia ao desalinhamento. A segunda constatação é com relação à estabilidade da correção. Como é possível ser observada nessa figura, a trajetória traçada pelo manipulador apresenta-se irregular, com um formato em “s”, resultando em um cordão com aspecto ruim e apresentando mordeduras nas laterais da junta.

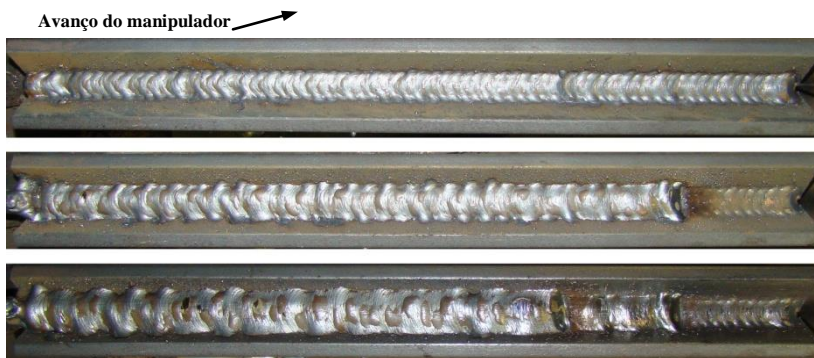


Figura 42 - Resultado da soldagem com a peça desalinhada em 15° utilizando o algoritmo II (mudança no limite superior).

O comportamento instável mencionado acima é consequência da ocorrência de *overshoot*, ou sobrepassagem, e acontece quando a correção calculada pelo sistema de controle é maior de que a necessária. Esta ocorrência de *overshoot* é refletida pela regularidade dos valores de erro aquisitados pelo TARTÍLOPE, e também nos valores de correção calculados a partir destes. Como é possível serem observados no gráfico da figura 43, por exemplo, referente ao primeiro passe, esses valores se

encontram dispersos ora positiva, ora negativamente, não condizendo com o erro contínuo, imposto pelo desalinhamento.

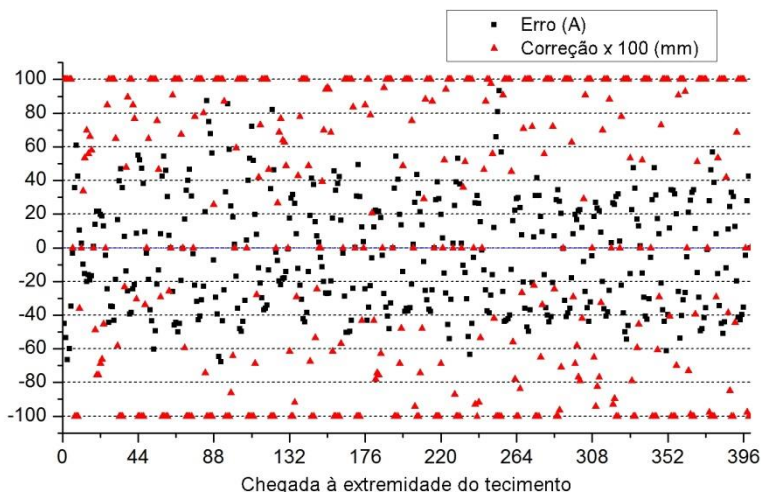


Figura 43 - Valores de erro aquisitados pelo TARTÍLOPE V2F e as correções respectivas a esses valores resultantes da soldagem com o algoritmo II (primeiro passe).

4.1.2 Algoritmo III (2ª modificação)

Uma vez que o sistema estava apresentando *overshoot*, foi definida uma estratégia para o estabelecimento do valor ideal de “K” tendo-se em vista o comportamento regular do automatismo da correção. Esta estratégia se deu da seguinte maneira:

- Primeiramente, foram retirados os limites inferiores e superiores de correção;
- Em seguida, foi realizada a transformação da constante “K” em variável, e adicionada uma função que possibilita seu ajuste durante a soldagem, por meio do joystick;
- Um corpo de prova é posicionado com desalinhamento de 15° em relação ao trilho do TARTÍLOPE;
- É iniciada a soldagem do primeiro passe deste corpo de prova, partindo-se de um valor baixo de “K” e aumentando-se gradativamente no decorrer da soldagem;

- Uma vez finalizada a soldagem do primeiro passe, é gerado um gráfico com os erros, correções e os valores de “K” utilizados nos cálculos destas correções;
- O valor de “K” adotado como ideal é aquele imediatamente anterior à ocorrência de *overshoot*, em que os erros estão relativamente próximos de zero e o sistema apresenta-se estável.

Uma vez definida a estratégia de obtenção do valor ideal de “K”, esta foi empregada na soldagem descrita anteriormente, segundo o procedimento apresentado na tabela 1. De acordo com o resultado alcançado neste ensaio, apresentado na figura 44, o valor ideal de “K” para que o sistema comporte-se de maneira regular é 0,0262 mm/A, ou seja, 75% do valor utilizado no ensaio anterior. Esta modificação influencia, também, as lógicas de limitação inferior e superior da correção. Por conseguinte, como, até esta etapa, não houve motivos que sustentassem sua utilização, estas lógicas foram mantidas fora do programa.

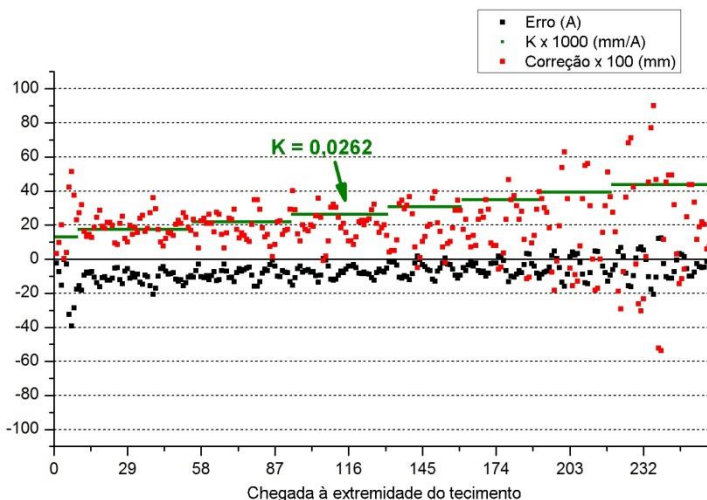


Figura 44 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K".

O resultado da soldagem com a modificação descrita acima, apresentado na figura 45, valida a eficácia da estratégia de determinação do valor ideal de “K” uma vez que houve uma melhora na regularidade

e no aspecto dos cordões de solda resultantes. Esta melhora pode ser verificada, também, nos gráficos da figura 46 em que é mostrado que as correções se dão em uma mesma direção durante, praticamente, toda a soldagem e os valores de erro encontram-se próximos de zero.

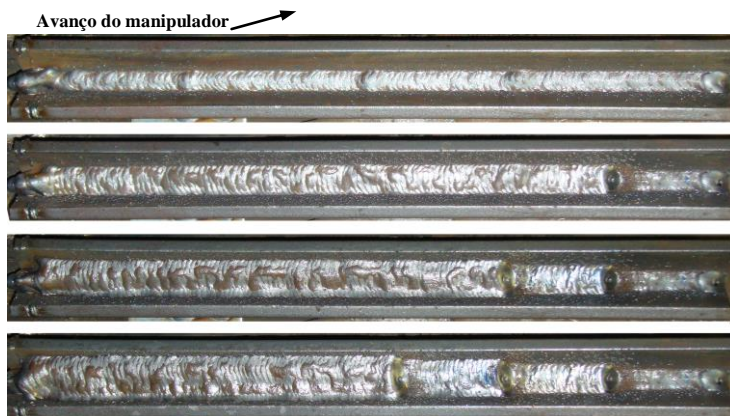


Figura 45 - Resultado da soldagem a peça desalinhada em 15° utilizando o algoritmo III (redução de 25% no valor de "K" e retirada dos limites).

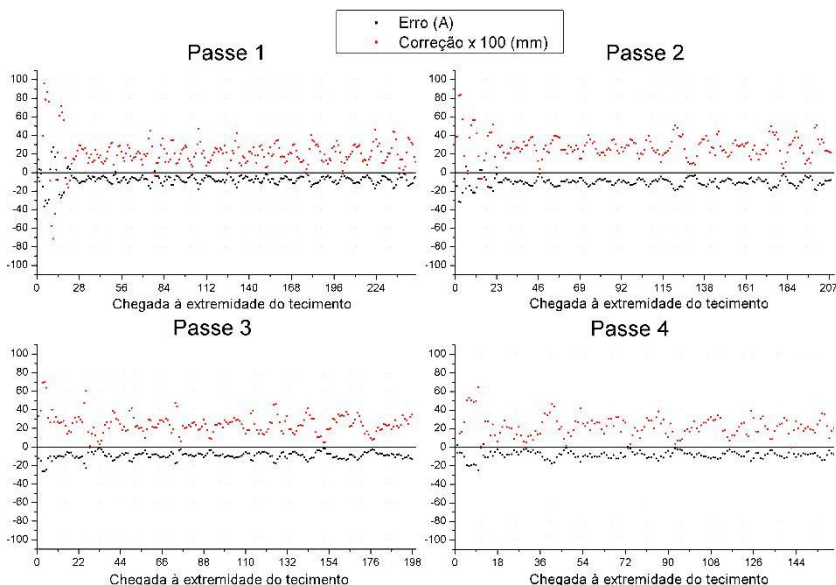


Figura 46 - Valores dos erros e das correções resultantes de trechos da soldagem com o algoritmo III.

4.2 MELHORIAS NA FUNCIONALIDADE DE SEGUIMENTO DE JUNTA DO TARTÍLOPE V2F

Os resultados apresentados até esta etapa do trabalho mostraram que é possível utilizar o TARTÍLOPE V2F na soldagem vertical ascendente com seguimento de junta a arco. No entanto, seu algoritmo de correção de trajetória apresenta deficiências que limitam a operacionalidade do sistema. Este capítulo apresenta alguma dessas limitações e as implementações que foram realizadas para superá-las e, assim, aumentar a robustez da funcionalidade de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F. Essas implementações estão descritas a seguir e envolvem a movimentação da tocha de soldagem, os componentes da soldagem e a lógica de controle utilizada pelo manipulador na realização do seguimento automático da junta.

As soldagens realizadas na etapa seguinte se deram com corpos de prova no modelo dos utilizados até então e foi realizado o primeiro passe dessas.

4.2.1 Influência da movimentação da tocha de soldagem sobre o automatismo do seguimento de junta

Se, por exemplo, for considerado um sistema responsável pelo controle do nível de água de uma caixa que perde um litro d'água por segundo e a ação de controle acontece a cada segundo, este sistema deverá adicionar um litro de água por correção para conseguir manter o nível da caixa d'água.

No caso de haver uma mudança no número de ações de controle por segundo do sistema descrito acima, passando, por exemplo, a ocorrer o dobro de vezes por segundo, a este sistema, bastaria reduzir a correção pela metade, ou seja, meio litro d'água por correção. Se a correção passar a ocorrer apenas a cada dois segundos, ele deve recompor o nível da água adicionando dois litros de água por correção; e assim por diante.

Se a mudança do caso inicial, no entanto, ocorrer na quantidade perdida d'água por segundo, aumentando, por exemplo, para o dobro, o sistema de controle deverá adicionar o dobro d'água por correção, ou seja, dois litros. Assim como, se, ao invés disso, a quantidade perdida d'água for reduzida pela metade, meio litro por segundo, o sistema deverá adicionar apenas a metade da quantidade d'água que era adicionada inicialmente por correção; e assim por diante.

Considerando o exposto acima, tem-se que o valor da correção necessário para estabilidade de um sistema é inversamente proporcional ao número de correções por segundo e diretamente proporcional à taxa de crescimento do erro.

No caso do TARTÍLOPE V2F, o número de correções por segundo é relacionado à frequência de tecimento, e a taxa de crescimento do erro, à velocidade de soldagem. Desta forma, foram realizadas modificações no cálculo da correção, de modo a permitir que estas variáveis de movimentação sejam modificadas sem comprometer o automatismo do seguimento de junta. Ambas as modificações são descritas a seguir.

4.2.1.1 Frequência de tecimento

Como mencionado, no caso do TARTÍLOPE V2F, o número de ações de controle por segundo está diretamente vinculado à frequência do tecimento. Esta, por sua vez, influencia diretamente o valor de ΔIm correspondente a algum desalinhamento (como abordado no capítulo 2.2.2.2). Sendo assim, o sistema deve reajustar o valor da correção quando for modificada a frequência de tecimento, pois há uma mudança no número de correções por segundo, assim como, no valor ΔIm para um mesmo desalinhamento. A filtragem também interfere neste valor, uma vez que quanto maior for a frequência do sinal que entra em um filtro passa-baixa, maior será a atenuação provocada por este, exigindo, assim, algum tipo de compensação na correção. Desta forma, torna-se necessária uma forma de embutir todas estas considerações, de modo a ser possível o emprego de diferentes frequências de tecimento na soldagem sem comprometimento do automatismo da correção automática da trajetória da tocha.

Considerando o exposto acima, foi substituído o valor constante de “K” por uma equação que descreve a curva de tendência de seu valor ideal para diferentes frequências de tecimento. Para determinar esta equação, foi realizado o procedimento de determinação de “K” em outras soldagens, cada qual com uma nova frequência de tecimento, e, em seguida, realizada uma análise de regressão a partir das combinações obtidas.

O primeiro ensaio realizado para a definição da curva de tendência de “K” se deu com 1,7 Hz de frequência de tecimento, aproximadamente três vezes o valor anterior (0,5 Hz). Para poder haver esta mudança sem comprometimento da soldagem, foi mantida a relação entre tempo da tocha em movimento e em espera empregada nos ensaios

anteriores (37% do tempo em movimento) tendo, assim, que ser reduzido o tempo de parada para 0,19 s.

Uma vez definida a nova movimentação da tocha, foi realizado o procedimento de determinação do valor ideal de “K” para esta nova condição de soldagem. De acordo com o resultado alcançado neste ensaio, o valor ideal de “K” para que o sistema comporte-se da maneira regular, como mostra a figura 47, é 0,0131 mm/A, metade do valor empregado na soldagem com 0,5 Hz de frequência de tecimento.

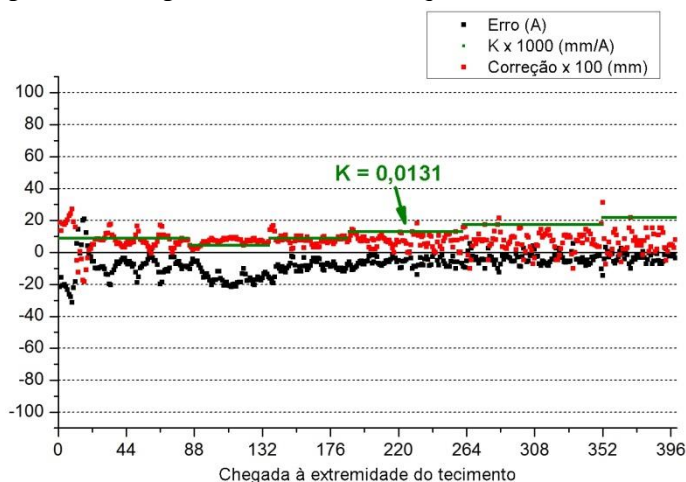


Figura 47 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para a frequência de 1,7 Hz de tecimento.

Com um novo valor de “K” sugerido pela estratégia desenvolvida, foi realizada a soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento e a peça desalinhada 15° com o trilho do manipulador, de modo a validar o emprego dessa estratégia para frequências diferentes da empregada até então (0,5 Hz). O resultado desta, apresentado na figura 48 e figura 49, valida, novamente, a eficácia dessa estratégia e evidencia a necessidade de redução no valor de “K” com o aumento da frequência de tecimento.

Avanço do manipulador →



Figura 48 - Resultado da soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento, "K" igual a 0,0131 mm/A e a peça desalinhada 15°.

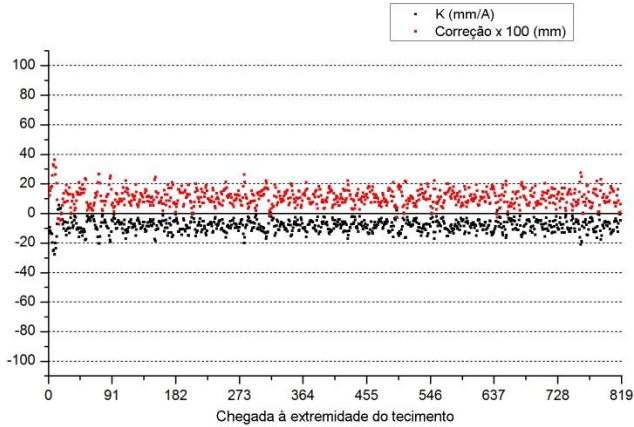


Figura 49 - Valores dos erros e correções resultantes da soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento, "K" igual a 0,0131 mm/A e a peça desalinhada 15°.

No segundo ensaio realizado para a definição do comportamento de “K”, foram novamente modificadas a frequência de tecimento e os tempos em parada, esta vez para 2,4 Hz e 0,13 s, respectivamente, e realizado, em seguida, o procedimento de determinação do valor ideal de “K”.

O resultado da determinação do valor de “K” para 2,4 Hz de frequência de tecimento está apresentado na figura 50 e aponta o valor de 0,0083 mm/A como valor adequado para esta condição.

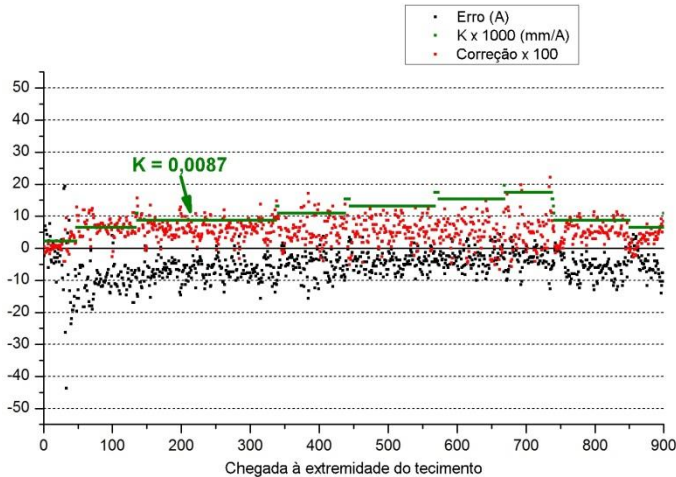


Figura 50 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para 2,4 Hz de frequência de tecimento.

Uma vez obtidas três combinações de “K” e frequência de tecimento que resultam em soldagens com comportamento regular do seguimento de junta, passou-se para a etapa de determinação da equação que descreve a curva de tendência do valor ideal de “K” para diferentes frequências de tecimento. Para tanto, foi gerado um gráfico de dispersão no *software Microsoft Excel*, com as combinações de valores obtidas e, em seguida, adicionada uma linha de tendência entre as combinações. Esta linha pode ser obtida por diferentes tipos de análise de regressão, como, por exemplo: linear, logarítmica, polinomial, potência, e média móvel; entretanto, a que melhor representou os valores foi a exponencial, figura 51, apresentando R^2 aproximadamente igual a um.

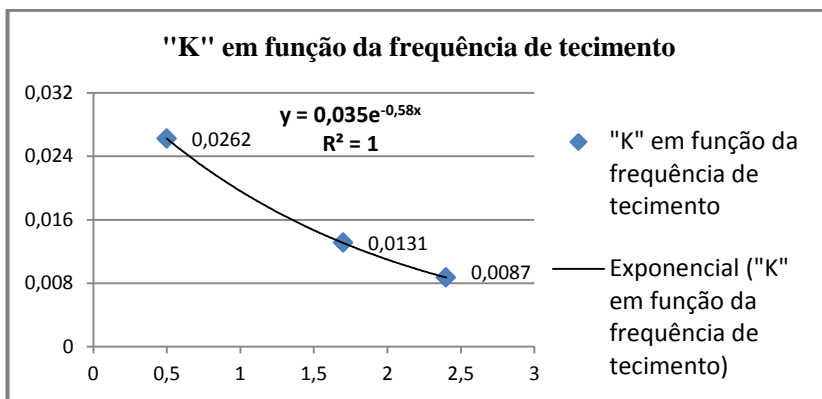


Figura 51 – Linha de tendência das combinações entre "K" e frequência de tecimento.

Equacionada a linha de tendência da variável “K” em função da frequência de tecimento, bastou-se definir esta como nova variável “K” do TARTÍLOPE V2F.

O *software* do TARTÍLOPE V2F foi desenvolvido em C. Deste modo, a variável “K” foi programada conforme a equação 5.

$$K = 0.035 * \text{pow}(M_E, -0.58 * \text{freq_osc}) \quad (5)$$

4.2.1.2 Velocidade de soldagem

Em uma soldagem com a peça inclinada, quanto mais rápido for o avanço da tocha, maior é a distância que tem que ser corrigida pelo

sistema, para uma mesma frequência de tecimento. Isso acontece porque há um aumento na taxa de crescimento do erro. Deste modo, tem-se que o cálculo de correção realizado pelo TARTÍLOPE V2F deve ser obtido considerando a velocidade de soldagem utilizada. Assim, foi embutida na equação de “K” uma relação entre a velocidade de soldagem ajustada pelo usuário (Vel_sold) e a velocidade utilizada na obtenção da equação 5. Desta forma, a variável “K” foi novamente reprogramada, resultando na equação 6.

$$K = \frac{Vel_sold}{1} * 0.035 * pow(M_E, -0.58 * freq_osc) \quad (6)$$

A partir do novo formato de “K”, o TARTÍLOPE V2F tornou-se apto à realização de ajustes no cálculo da correção em decorrência de mudanças na frequência do tecimento e/ou na velocidade de soldagem.

4.2.2 Influência da configuração e dos componentes da soldagem sobre a variação elétrica e o automatismo do seguimento de junta

O valor de ΔIm para um desalinhamento qualquer, segundo o que foi concluído no capítulo 2.2.2.2, depende de diversos fatores, dentre estes: velocidade com que o arame é alimentado, velocidade com que a tocha desloca-se de uma lateral à outra da junta, ângulo do chanfro, capacidade de resposta da fonte de soldagem a uma mudança em Vap e velocidade de soldagem. Deste modo, é necessário o reajuste da correspondência entre desalinhamento e ΔIm sempre que um destes fatores for alterado.

Foi adicionada uma variável no cálculo da correção que tem por finalidade o ajuste da relação, descrita acima, entre desalinhamento e ΔIm . Esta variável foi denominada “ganho”, tem originalmente valor igual a um - que seria, basicamente, a representação da condição na qual as soldagens descritas até esta etapa se deram - e pode ser modificada em acordo com a necessidade. Se, por exemplo, fosse passado a utilizar um corpo de prova com ângulo de chanfro mais fechado, a variação da corrente seria intensificada e, desta forma, a relação entre desalinhamento e ΔIm seria comprometida. Neste caso, essa nova variável possibilitaria a correção dessa relação de forma independente às correções relacionadas à velocidade de soldagem e à frequência de tecimento.

Pelo fato de o TARTÍLOPE V2F se tratar de um sistema automatizado com enfoque na soldagem em estaleiros, é conveniente

que este seja de fácil operacionalidade, de modo que não seja exigido do operador conhecimento em teoria de controle, mas somente em soldagem. Considerando isto, foi automatizado o ajuste da variável “ganho” por meio da adição de uma rotina de calibração ao programa do TARTÍLOPE V2F. Esta calibração - diferentemente das necessárias para a operação do sistema da MOTOMAN, por exemplo - é de fácil realização, necessitando, apenas, que o operador realize a soldagem de uma peça visualmente alinhada¹⁰.

O ajuste automático da variável “ganho” foi definido a partir da ideia de que o desvio padrão das correções realizadas em uma soldagem com a peça alinhada deve seguir um valor “padrão”.

O desvio padrão das correções (mm) reflete a relação desalinhamento/ ΔI_m , sendo, basicamente, igual à multiplicação entre desvio padrão dos erros (A) e “K” (mm/A) (para uma soldagem com o seguimento de junta habilitado). Logo, se, por algum motivo, a corrente de soldagem estiver variando com intensidade diferente da esperada, o desvio padrão dos erros e, conseqüentemente, das correções apresentarão valores também diferentes dos esperados. Por conseguinte, é possível reestabelecer o valor desse último por intermédio da variável “ganho”.

A variável “ganho” passou a ser definida como a razão entre o desvio padrão “padrão” e o desvio padrão das correções realizadas durante a calibração. Desta forma, seu valor tornou-se inversamente proporcional a este último.

A definição do desvio padrão “padrão” das correções e a constatação da relação inversamente proporcional entre desvio padrão e “ganho” estão descritos a seguir.

4.2.2.1 Desvio padrão “padrão”

O desvio padrão das correções que foi adotado como padrão para o cálculo de ajuste da variável “ganho” foi obtido a partir de soldagens do primeiro passe, com a peça alinhada. Estas soldagens empregaram os

¹⁰ Esta “maior facilidade”, em comparação com o sistema da MOTOMAN, é possível porque a correção automática da trajetória da tocha necessita estar habilitada durante esta calibração e, assim, são permitidos pequenos desalinhamentos entre a peça e a tocha. Além do mais, não é necessário que o operador defina nenhuma variável que não seja relacionada à movimentação da tocha de soldagem.

mesmos equipamentos, corpos de prova e movimentação utilizados nos capítulos 4.1.2 e 4.2.1.1. Ou seja, foram realizadas três soldagens com a peça alinhada, cada qual com uma frequência de tecimento e tempo de parada diferente, e foram avaliados os desvios padrões das correções de cada uma dessas.

O desvio padrão das correções realizadas em cada soldagem foi calculado utilizando as equações 7, 8 e 9, apresentadas a seguir.

$$Valor_{méd} = Valor_{atual} \times \alpha + Valor_{méd_{ant}} \times (1 - \alpha) \quad (7)$$

$$Valor_{RMS} = \sqrt{(Valor_{atual}^2 \times \alpha) + (Valor_{RMS_{ant}}^2 \times (1 - \alpha))} \quad (8)$$

$$Desvio_{padrão} = \sqrt{Valor_{RMS}^2 - Valor_{méd}^2} \quad (9)$$

Onde: $Valor_{méd}$ = Valor esperado de uma variável aleatória;

$Valor_{atual}$ = Valor instantâneo de uma variável aleatória;

$Valor_{méd_{ant}}$ = Valor esperado anterior à realização do cálculo;

α = Constante de amortecimento;

$Valor_{RMS}$ = Valor eficaz de uma variável aleatória;

$Valor_{RMS_{ant}}$ = Valor eficaz anterior à realização do cálculo;

$Desvio_{padrão}$ = Desvio padrão de uma variável aleatória;

A equação 7 é conhecida como amortecimento exponencial (*exponential smoothing*) e foi sugerida pela primeira vez em 1956, por Robert Goodell Brown [33]. Esta equação é, basicamente, um filtro RC discretizado em que o α é o fator de amortecimento (associado à frequência de corte do filtro), e pode ser utilizada para obter-se o valor esperado de uma variável aleatória.

A equação 8 não é encontrada na literatura¹¹ e foi estabelecida pelo autor, com o intuito de obtenção do valor eficaz esperado de uma variável aleatória. Sua eficácia pode ser conferida na figura 52, em uma comparação com o cálculo do valor eficaz de uma série de dados, utilizando o *software Microsoft Excel*.

¹¹ Segundo pesquisas realizadas pelo autor.

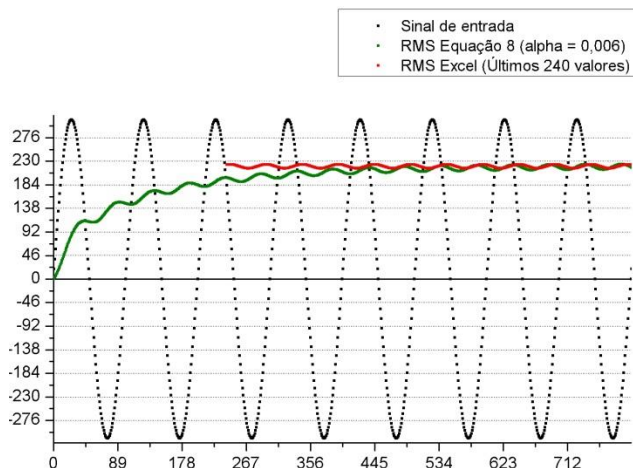


Figura 52 - Comparação entre o valor eficaz obtido por meio da equação 8 e o valor eficaz obtido por meio do *Software Excel*.

A equação 9 refere-se ao cálculo de desvio padrão de uma variável aleatória, partindo-se dos valores médio e eficaz dessa variável [34].

O cálculo do desvio padrão das correções se deu da seguinte maneira:

1. Primeiramente, são filtrados os valores das correções por meio das equações 7 e 8¹², paralelamente;
2. Em seguida, é calculado o desvio padrão mais atual das correções utilizando-se a equação 9;
3. Por último, é realizada a filtragem do desvio padrão calculado, por meio da equação 7¹³.

Foi utilizado o menor valor de desvio padrão apresentado em cada ensaio - considerado a partir da quadragésima quinta chegada a alguma extremidade do tecimento - como desvio padrão resultante. Esta

¹² Foi atribuído o valor 0,1 para a constante α em todas as equações.

¹³ O cálculo do desvio padrão empregado neste trabalho apresenta resultados muito similares à da filtragem do cálculo do desvio padrão de uma série de dados, porem, utiliza menos memória RAM, devido ao menor número de variáveis necessárias.

estratégia foi utilizada para que seja possibilitada apenas a utilização dos trechos mais estáveis de cada soldagem.

O primeiro ensaio realizado para definição do desvio padrão “padrão”, segundo o procedimento apresentado anteriormente, foi o que utiliza 0,5 Hz de frequência de tecimento e 0,64 s de tempo de parada nas laterais. O resultado deste está apresentado na figura 53 em que foi constatado o valor 0,0634 mm como desvio padrão mínimo apresentado no ensaio.

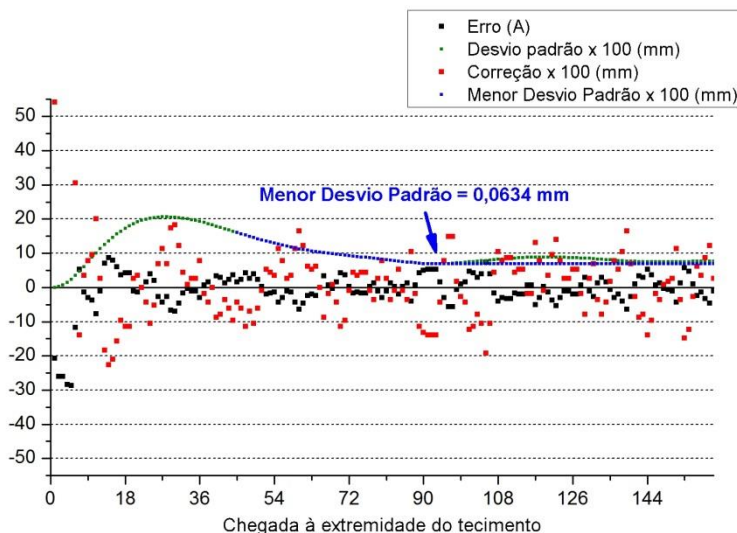


Figura 53 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 0,5 Hz e a peça alinhada.

O segundo ensaio empregou a movimentação referente à primeira soldagem do capítulo 4.2.1.1, em que é utilizada uma frequência de tecimento de 1,7 Hz e tempos de parada em 0,19 s. O resultado desta soldagem está apresentado na figura 54 em que é possível observar o valor 0,0295 mm como desvio padrão mínimo da correção.

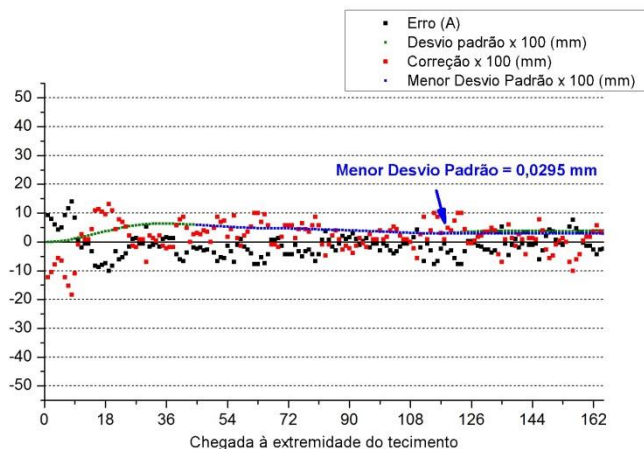


Figura 54 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 1,7 Hz e a peça alinhada.

O terceiro ensaio empregou a movimentação referente à segunda soldagem do capítulo 4.2.1.1, em que é utilizada uma frequência de tecimento de 2,4 Hz e tempos de parada em 0,13 s. O resultado desta soldagem está apresentado na figura 55 em que é possível observar que foi encontrado o valor 0,0199 mm como menor desvio padrão das correções executadas nesse ensaio.

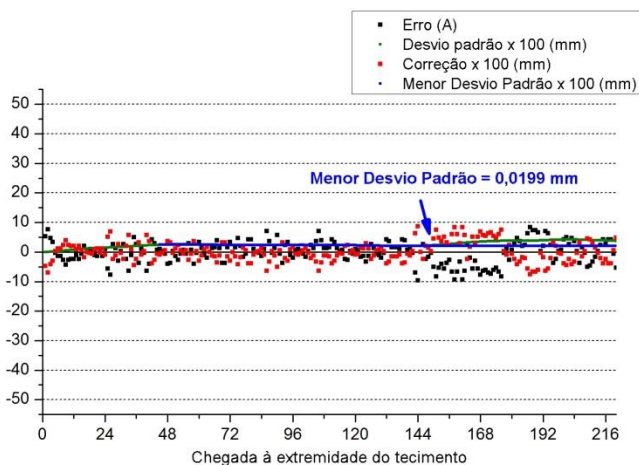


Figura 55 – Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com 2,4 Hz e a peça alinhada.

Uma vez encontrados os menores valores de desvio padrão das correções executadas nos ensaios deste capítulo, foi determinada a linha de tendência desse valor em função da frequência de tecimento. Para tanto, foi gerado um gráfico de dispersão no *software Microsoft Excel*, com as combinações de valores obtidas e, em seguida, adicionada uma linha de tendência entre as combinações. A linha de tendência do tipo logarítmica, apresentada na figura 56, foi a que melhor representou os valores de desvio padrão e apresentou R^2 aproximadamente igual a um. Esta linha de tendência obtida foi denominada desvio padrão “padrão”.

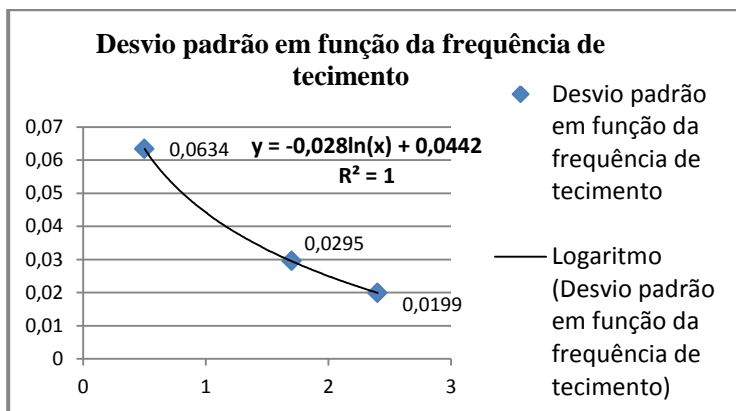


Figura 56 – Linha de tendência das combinações entre desvio padrão das correções e frequência de tecimento.

4.2.2.2 Estabelecimento da relação entre desvio padrão e “ganho”

Uma vez obtido um padrão de desvio padrão das correções, foi realizada uma modificação em uma das soldagens descritas acima e, em seguida, avaliado seu desvio padrão e seu valor ideal de “K”, de modo a constatar uma relação inversamente proporcional entre ambos.

A modificação da soldagem “padrão” se deu na amplitude de soldagem, uma vez que a velocidade e a frequência de tecimento devem ser mantidas. Para tanto, foi modificada a amplitude do movimento de tecimento da soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento, passando-a de 3,7 mm para 5 mm.

O resultado do desvio padrão das correções realizadas durante a soldagem com amplitude de 5 mm e a peça alinhada é apresentado na figura 57. Segundo este, foi indicado um desvio padrão mínimo de

0,0416 mm nas correções, um aumento de 41% em comparação ao “padrão” (0,0295).

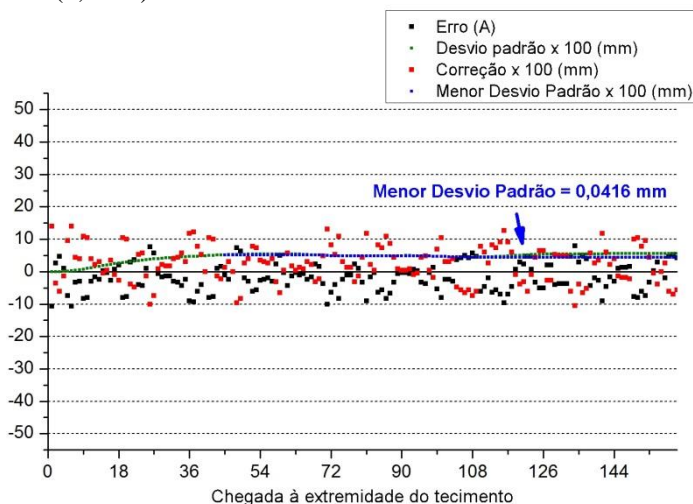


Figura 57 - Comportamento do desvio padrão das correções realizadas na soldagem com amplitude de 5 mm, 1,7 Hz de frequência de tecimento, peça alinhada e “ganho” igual à um.

Considerando a suposta relação inversamente proporcional entre o desvio padrão da correção automática e o valor ideal de “K”, o aumento de 42% no desvio implicaria a redução de “K” para 70,5% de seu valor original (“ganho” igual a 0,705). Desta forma, o valor ideal de “K” para esta soldagem passaria de 0,0131 mm/A para 0,0092 mm/A, aproximadamente. Para constatar esta relação, foi realizado o procedimento de determinação do valor ideal de “K” para essa nova soldagem.

O resultado da determinação do valor ideal de “K” para a soldagem com 1,7 Hz e amplitude de 5 mm está apresentado no gráfico da figura 58. Segundo este ensaio, o valor ideal de “K” para esta condição é aproximadamente 0,0087 mm/A, muito próximo do valor esperado de 0,0092 mm/A, mas um pouco menor. Entretanto, é possível ser observado neste ensaio que o valor encontrado para “K” resultou em valores de erro demasiadamente afastado do zero - em comparação com os ensaios de definição de “K” realizados nos outros capítulos - enquanto o valor seguinte apresentou *overshoot*. Isto ocorreu porque o incremento de “K” estava muito grande para esta situação. Desta forma, pode ser afirmado que, segundo os resultados anteriores, o valor de “K”

deve ser maior do que o valor encontrado, 0,0087 mm/A, e menor do que 0,0109 mm/A (início do *overshoot*). Além do mais, como pode ser observado na figura 59, ambos os valores apresentaram resultados de solda parecidos, uma vez que o cordão apresenta um bom aspecto por toda sua extensão, e, assim, há uma faixa razoável de valores que apresentam bons resultados de solda. Desta maneira, é validada a estratégia de utilização do desvio padrão das correções no reajuste da variável “K”.

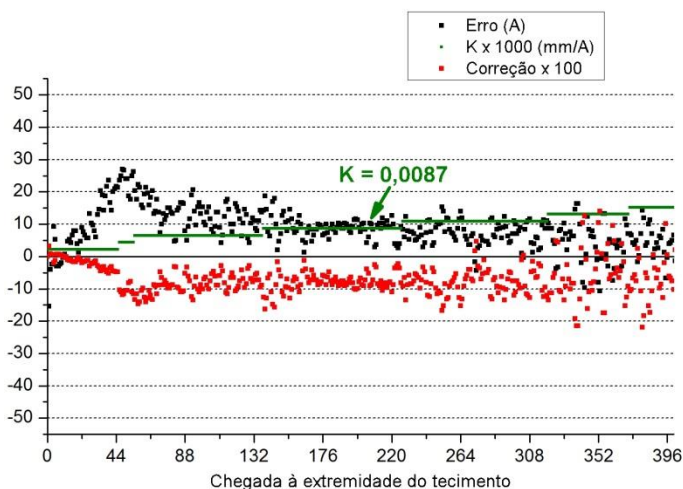


Figura 58 - Ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para 1,7 Hz de frequência de tecimento com a amplitude aumentada para 5 mm.

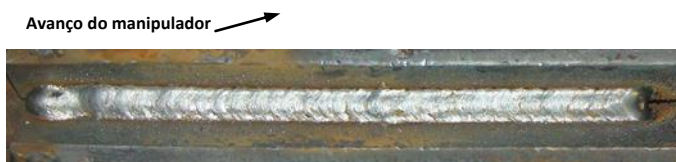


Figura 59 - Cordão de solda resultante do ensaio de determinação do valor ideal da variável "K" para a soldagem com 1,7 Hz de frequência de tecimento e amplitude de 5 mm.

A linha de tendência da figura 56 foi obtida utilizando-se a mesma velocidade de soldagem adotada na definição das equações 5 e 6. No entanto, é importante ser observado que a velocidade empregada em uma soldagem influencia o valor de “K” que será utilizado nessa soldagem. Dessa forma, ela influencia também o valor esperado de

desvio padrão das correções. Assim, é possível calcular o valor de desvio padrão esperado para uma soldagem qualquer, a partir da adição da razão entre a velocidade empregada na calibração e a velocidade utilizada na definição das equações 5 e 6 (1 mm/s), à linha de tendência da figura 56; compondo, desta forma, o desvio padrão “padrão” das correções.

Uma vez que existe uma relação entre o desvio padrão das correções, resultante de uma soldagem qualquer, e o valor ideal de “K” para esta soldagem, tem-se que a variável “ganho” deve ser definida como a relação entre o desvio padrão “padrão”, ou esperado, e o desvio padrão resultante dessa soldagem.

Considerando as conclusões apresentadas neste capítulo, tem-se que a equação que define a variável “ganho” - em acordo com a programação em C empregada no TARTÍLOPE V2F - deve ser igual à equação 10.

$$ganho = \frac{\frac{Vel_{sold}}{1} * (-0,028 * \log(freq_{osc}) + 0,0442)}{Desvio_{padr\tilde{a}o_{calibração}}} \quad (10)$$

Onde: Vel_{sold} = Velocidade de soldagem empregada na calibração;

$freq_{osc}$ = Frequência de tecimento empregada na calibração;

$Desvio_{padr\tilde{a}o_{calibração}}$ = Menor desvio padrão obtido na calibração;

4.2.3 Controle PI

Se for considerado o exemplo da caixa d’água que perde um litro por segundo, apresentado no início do capítulo 4.2.1, e for utilizado um controlador do mesmo tipo que o do TARTÍLOPE V2F (proporcional) para manter o nível d’água com um volume determinado, o nível médio d’água sempre ficará abaixo do desejado. Este fenômeno é intrínseco deste tipo de controle e pode ser observado, por exemplo, no gráfico da figura 60. Neste gráfico está representado um sistema desse tipo, com o valor da correção e erro em uma relação de um para um (“KP” = 1), e está exposto que o nível correto d’água não é estabelecido na presença de um erro constante. A diferença entre o nível d’água que o sistema é capaz de alcançar e o nível desejado é conhecida como erro em regime permanente.

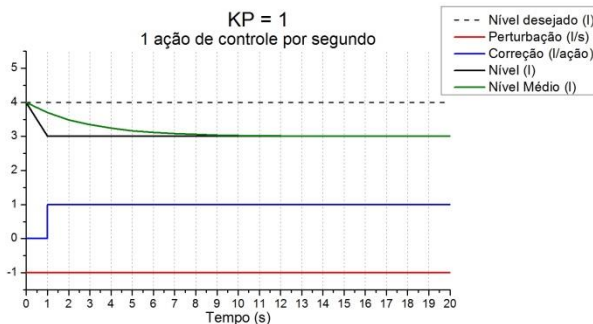


Figura 60 - Exemplo de um sistema com controle proporcional, correção igual ao valor de erro, e uma ação de controle por segundo.

No TARTÍLOPE V2F, o erro em regime permanente é sinônimo de desigualdade no depósito do cordão de solda em relação às duas laterais da junta. Quanto maior a razão entre a velocidade de soldagem e a frequência de tecimento, e quanto menor a velocidade de alimentação do arame, por exemplo, mais desigual é este depósito.

Há duas maneiras de reduzir o erro em regime permanente presente em controladores do tipo proporcional: aumentando o valor da correção, ou aumentando o número de ações de controle por segundo.

Considerando-se o exemplo mencionado da caixa d'água, se for aumentado o valor da correção de forma que este seja maior do que a diferença entre o nível interpretado e o nível desejado - como está exemplificado a seguir, no gráfico da figura 61 - o nível médio d'água irá ficar mais próximo do desejado, porém, o sistema começará a apresentar um comportamento oscilatório, tendendo à instabilidade.

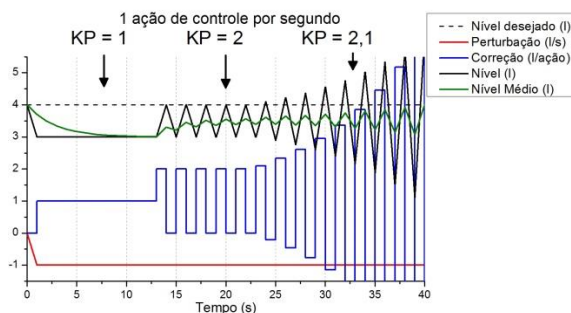


Figura 61 - Exemplo da influência do cálculo da correção em um sistema com controle proporcional.

No TARTÍLOPE V2F, a relação entre erro e correção é definida a partir do procedimento desenvolvido de definição do valor ideal de “K”. Nas soldagens apresentadas até esta etapa, este procedimento resultou em cordões com bom aspecto e semelhantes aos cordões realizados com a peça alinhada. Em algumas soldagens, entretanto, como no caso de algumas soldagens na posição vertical descendente, o erro em regime influencia tanto o aspecto do cordão que nenhum valor de “K” é capaz de resultar em um cordão satisfatório. Um exemplo disto é apresentado na figura 62 e na figura 63. Nesses casos, se o valor de “K” é ajustado com um valor pequeno, o cordão fica concentrado majoritariamente em uma lateral, e se “K” é ajustado com um valor grande, o cordão apresenta-se com aspecto ruim. Ou seja, não é possível satisfazer esse tipo de soldagem utilizando a lógica proporcional, pois nenhum valor de “K” possibilita um resultado aceitável na soldagem com a peça desalinhada.

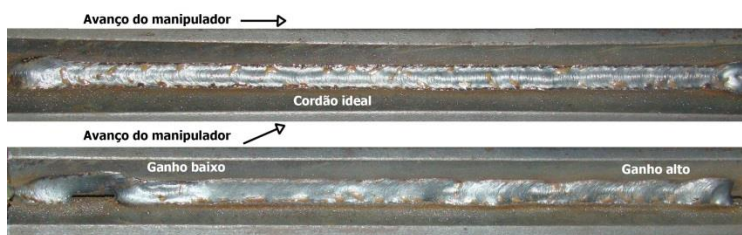


Figura 62 - Exemplo da presença de erro em regime permanente em soldagem com seguimento automático de junta (soldagem alinhada acima e soldagem desalinhada abaixo).

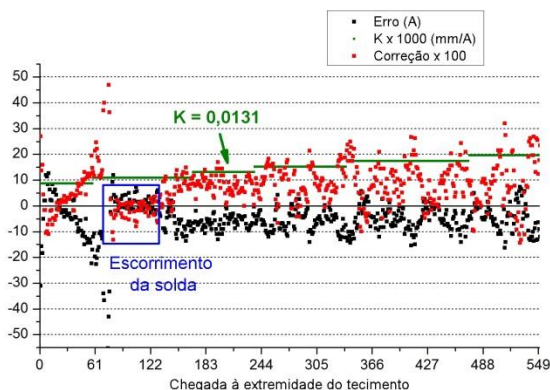


Figura 63 - Definição de “K” para um caso em que nenhum de seus valores é capaz de resultar em um cordão aceitável.

O aumento no número de correções por segundo é a maneira mais eficaz de se reduzir o erro em regime permanente sem prejudicar o comportamento e estabilidade de um sistema controlado proporcionalmente ao erro. Como é apresentado no gráfico da figura 64, este aumento reduz o erro de forma estável. Para o caso do TARTÍLOPE V2F, no entanto, o número de ações de controle por segundo é vinculado à frequência de tecimento. Assim, este número é dependente da movimentação empregada na soldagem, que por sua vez é relativa à opção de cada operador, e, desta forma, não pode ser considerado como alternativa para redução do erro em regime permanente.

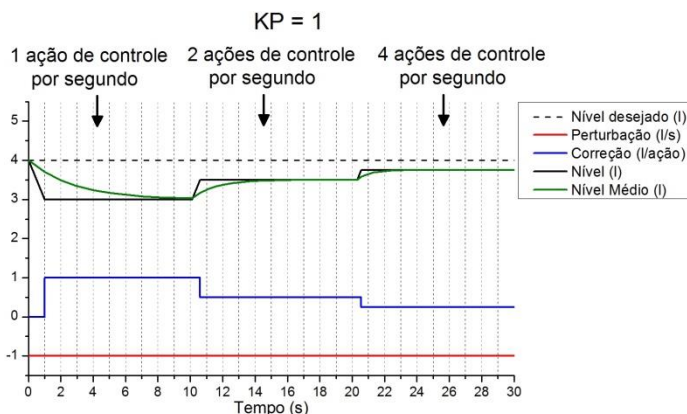


Figura 64 - Exemplo da influência do número de ações por segundo em um sistema com controle proporcional.

A adição de uma ação integradora é uma forma de extinguir o erro em regime permanente de um sistema de controle qualquer. Esta ação funciona como uma espécie de memória, acumulando uma parcela de cada erro interpretado pelo sistema.

Com a adição da ação integradora ao controlador proporcional, tem-se o controlador do tipo “PI”. Na figura 65 está apresentado um controlador deste tipo, em um exemplo no qual foi adicionada a ação integradora ao controlador da caixa d’água descrito anteriormente. Neste exemplo, a ação proporcional está com uma relação de um para um com o erro (“ KP ” = 1) e, a partir do instante 15 s, a ação integradora passa a memorizar o valor total de cada erro interpretado pelo sistema (“ KI ” = 1). Segundo o que está apresentado nesta figura, a ação integradora

conseguiu, de certa forma, prever o quanto deve ser adicionado a cada correção, e, assim, extinguir o erro em regime permanente.

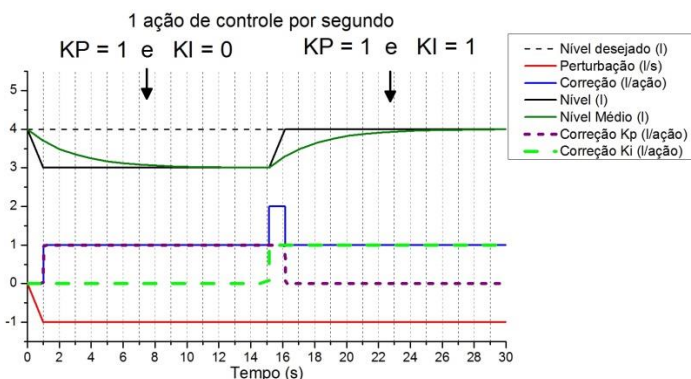


Figura 65 - Exemplo da influência da ação integradora em um sistema de controle.

A partir do que foi exposto sobre erro em regime permanente e o comportamento de um controlador do tipo “PI”, foi adicionado ao algoritmo de seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F a ação do tipo integradora. Para tanto, foi criada uma variável que acumula os valores de erro interpretados pelo sistema (*erro_ac*). Esta variável é multiplicada por outra variável, denominada *KI*, e o valor resultante é acrescentado à correção.

4.3 VALIDAÇÃO DAS IMPLEMENTAÇÕES

O funcionamento do seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F, a partir das implementações realizadas no capítulo 4.2, passou a se dar da maneira como exposta no fluxograma da figura 66. Neste fluxograma estão presentes todas essas implementações realizadas até esta etapa, diferindo-se do fluxograma inicial do TARTÍLOPE V2F (capítulo 2.3.1.3, figura 32) pelos blocos numerados em “1”, “2” e “3”, referentes a essas implementações.

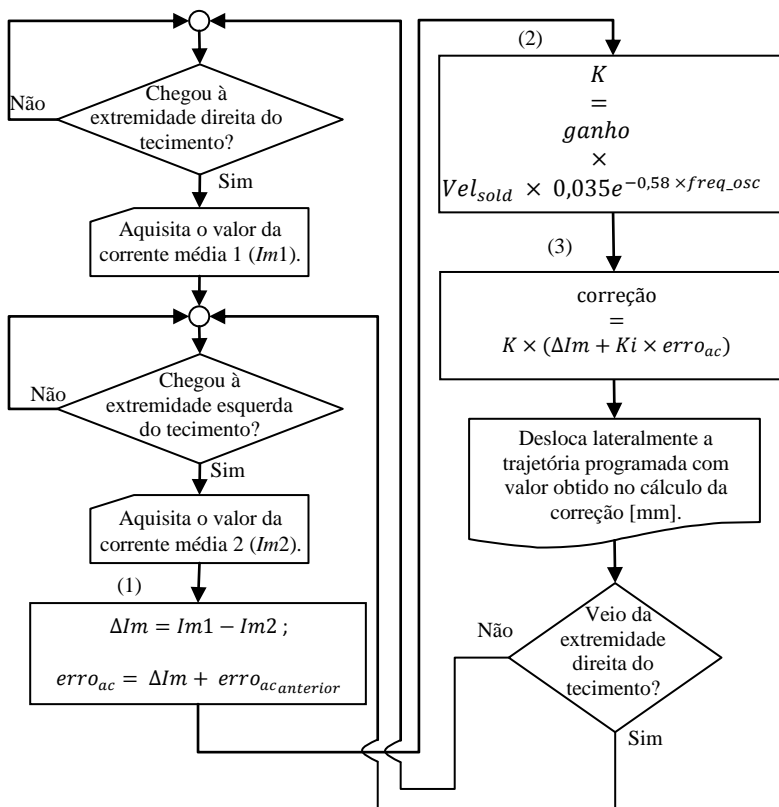


Figura 66 - Fluxograma do novo funcionamento da correção automática de trajetória da tocha de soldagem do manipulador cartesiano TARTÍLOPE V2F.

A seguir, são descritas soldagens que empregaram o algoritmo apresentado acima e a calibração definida no capítulo anterior.

4.3.1 Soldagem vertical descendente

A primeira soldagem a empregar o algoritmo da figura 66 é a mesma apresentada na figura 62. Ela foi realizada com os mesmos equipamentos e corpos de prova utilizados no capítulo 1.1.3. A regulagem da fonte de soldagem também foi a mesma. A movimentação, entretanto, foi diferente. Neste caso, a soldagem foi realizada na vertical descendente ao invés de ascendente. Além do mais, a velocidade de soldagem utilizada foi de 1,7 mm/s, a amplitude do

tecimento foi de 2 mm, a frequência 2 Hz, e não foram empregados tempos de parada nas laterais. Foi realizada a calibração dessa soldagem e o cordão de solda e o gráfico com os valores de erro, correção e desvio padrão da correção, resultantes desta, estão apresentados, respectivamente, nas figuras figura 67 e figura 68. Segundo estas figuras o cordão apresenta um bom aspecto e as correções apresentaram desvio padrão de 0,062 mm.



Figura 67 - Cordão de solda resultante da calibração da soldagem vertical descendente (peça alinhada).

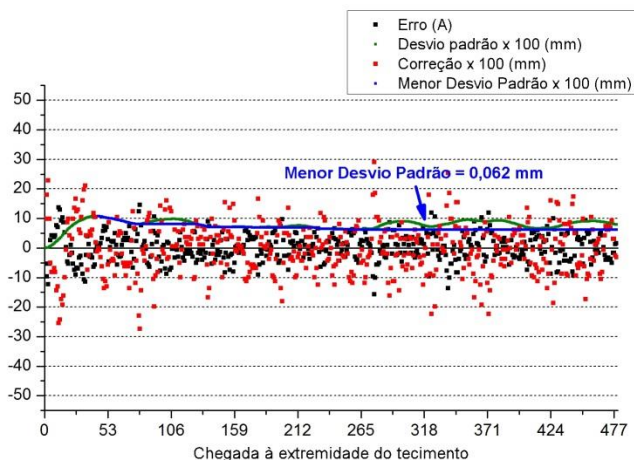


Figura 68 - Comportamento do desvio padrão das correções realizadas durante a calibração da soldagem vertical descendente.

Considerando o desvio padrão das correções resultante e a movimentação empregada na calibração da soldagem vertical acima, a variável “ganho” passa a ser igual a 0,68 e, desta forma, o “K” resultante é 0,0126 mm/A, um valor muito próximo ao “K” encontrado no ensaio apresentado na figura 63 (0,0131 mm/A), aquele no qual nenhum valor resultava em um cordão com bom aspecto.

Uma vez calibrado o sistema, foi iniciada a etapa de soldagem da peça desalinhada. Para tanto, foi desalinhada a peça em 15° e realizada a

soldagem desta com o “ganho” definido na calibração (0,68) e a constante integradora (KI) igual a 0,014 (valor estabelecido empiricamente). O resultado desta é apresentado na figura 69 e na figura 70, e mostra que, apesar do desalinhamento, o cordão resultante apresenta-se com um aspecto muito bom, parecido com o da soldagem com a peça alinhada, e o erro em regime permanente foi praticamente extinguido. É possível ser observada, também, uma irregularidade no início da solda. Isto é resultante do escorrimento do material acumulado antes do início da movimentação e, segundo o resultado, o sistema foi capaz de reestabelecer a correção com eficiência e eficácia após a perturbação.

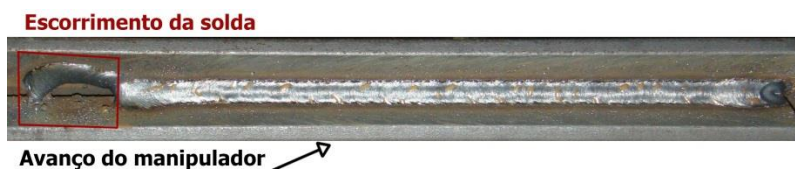


Figura 69 - Resultado da soldagem vertical descendente com a peça desalinhada em 15°.

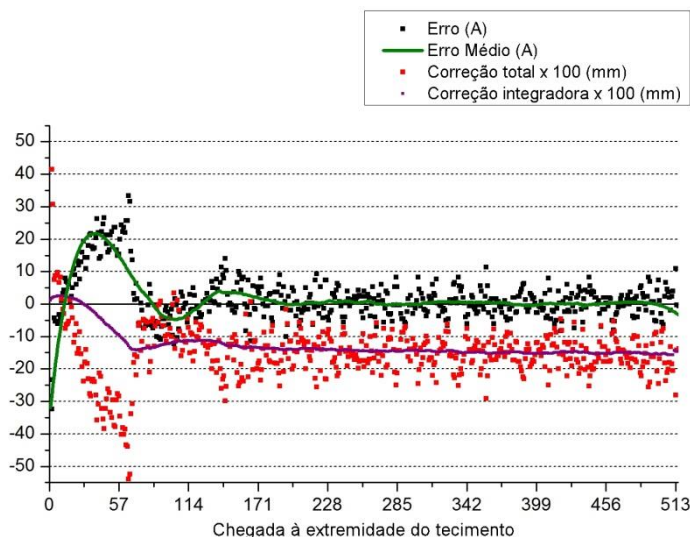


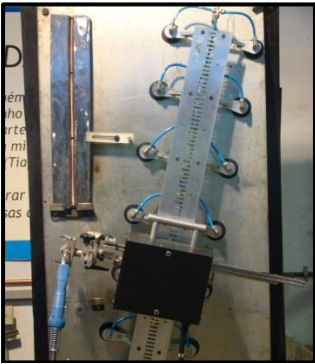
Figura 70 - Comportamento dos erros e das correções da soldagem vertical descendente com a peça desalinhada em 15°.

4.3.2 Soldagem vertical ascendente I

O algoritmo apresentado anteriormente foi empregado, também, na soldagem de um corpo de prova - com mesmo o perfil apresentado na figura 26, na página 51, porém com o afastamento entre as peças (*gap*) aumentado para 4 mm - que simula a curvatura de um casco de navio. Esta soldagem, como está apresentada na figura 71, envolveu uma versão do trilho flexível do TARTÍLOPE V2F que utiliza ventosas para a fixação à parede do casco¹⁴, posicionado inclinadamente, 15° em relação à peça. A fonte de soldagem foi a mesma utilizada nos ensaios realizados até o esta etapa, uma IMC INVERSAL 300. Ela foi regulada em 53 mm/s (3,2 m/min) de alimentação de arame, 20 V, com efeito indutivo de subida da máquina ajustado em 0,5 e descida em 4,5. Foi utilizado como gás de proteção uma mistura de 75% Ar e 25% CO₂ com 267 ml/s (16 l/min) de vazão. A movimentação empregada na soldagem de cada passe está descrita na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de movimentação utilizados nos ensaios.

Passe	Velocidade de soldagem	Amplitude do tecimento (<i>Weaving amplitude</i>)	Frequência do tecimento (<i>Weaving frequency</i>)	Tempos de parada (<i>weav stop</i>)
1	1 mm/s	4,1 mm	0,8 Hz	0,3/0,3 s
2	0,9 mm/s	9 mm	0,7 Hz	0,3/0,3 s



¹⁴ A versão original do trilho utiliza sapatas magnéticas. A versão com ventosa foi desenvolvida para soldagem em embarcações de materiais não magnéticos, como alumínio.

Figura 71 – Soldagem vertical ascendente utilizando um trilho fixado com ventosas, inclinado 15° com a peça.

A calibração da soldagem vertical utilizando o trilho com ventosa se deu a partir da soldagem, com o trilho alinhado, do primeiro e segundo passes de um corpo de prova com as mesmas características do descrito acima, no qual, foi utilizado, também, para definição dos parâmetros de movimentação. Essa calibração, como mostra a figura 72 e a figura 73, resultou em um desvio padrão das correções de 0,081 mm e 0,058 mm para o primeiro e segundo passe, respectivamente. Desta forma, a variável “ganho” foi definida em 0,58 para a soldagem do primeiro passe e 0,93 para o segundo. Esta diferença entre os valores de “K” condiz com o formato da junta durante a soldagem de cada passe, uma vez que a junta apresenta-se mais exposta no primeiro passe (raiz) que no segundo.

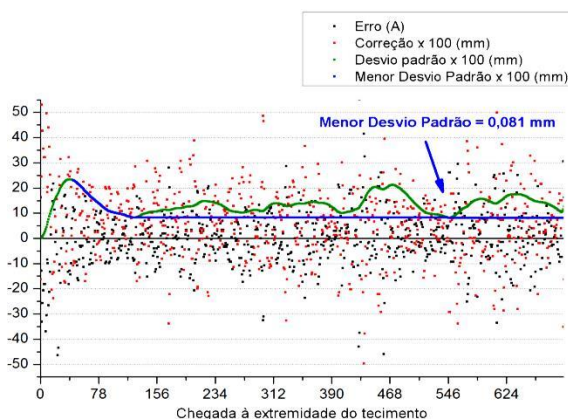


Figura 72 - Comportamento dos erros e das correções da calibração do primeiro passe da soldagem vertical ascendente I.

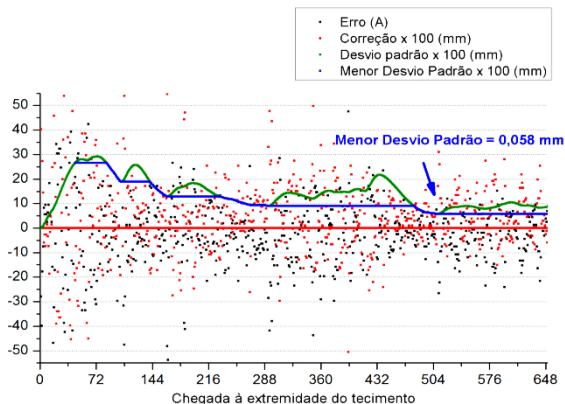


Figura 73 - Comportamento dos erros e das correções da calibração do segundo passe da soldagem vertical ascendente I.

O resultado da soldagem com o trilho desalinhado 15° está apresentado na figura 74. Segundo este, o manipulador foi capaz de realizar a soldagem de maneira íntegra por toda a extensão da junta e em todos os passes, validando as implementações realizadas e, também, a utilização de ventosas no trilho.

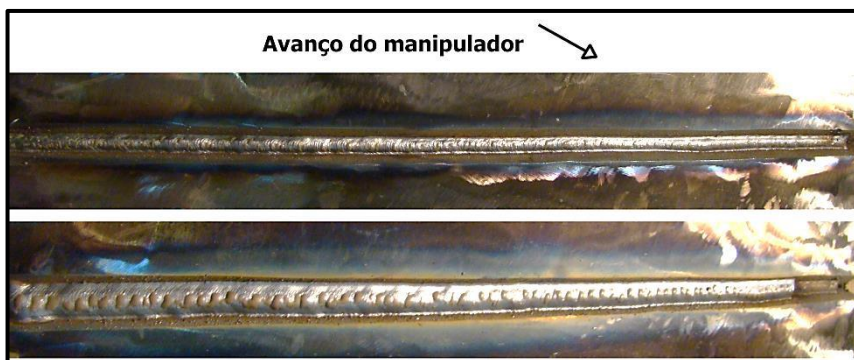


Figura 74 - Soldagem vertical ascendente com seguimento de junta utilizando o TARTÍLOPE V2F e um trilho com ventosas.

4.3.3 Soldagem de raiz, vertical ascendente II

O algoritmo apresentado anteriormente na figura 66 foi empregado, também, na soldagem de um corpo de prova - com mesmo o

perfil apresentado na figura 26, na página 51, porém com o afastamento entre as peças aumentado para 5 mm. Esta soldagem teve como enfoque a realização de uma raiz robusta com um reforço adequado, e a peça desalinhada 10° em relação ao trilho do TARTÍLOPE V2F. A fonte de soldagem foi uma IMC DIGITEC 450. Ela foi regulada em 53 mm/s (3,2 m/min) de alimentação de arame, 19 V, com efeitos indutivos de subida e descida ajustados em 15. Foi utilizado como gás de proteção uma mistura de 75% Ar e 25% CO₂ com 267 ml/s (16 l/min) de vazão. A movimentação empregada nesta soldagem está descrita na tabela 9.

Tabela 8 - Parâmetros de movimentação utilizados para a realização da raiz.

Passe	Velocidade de soldagem	Amplitude do tecimento (Weaving amplitude)	Frequência do tecimento (Weaving frequency)	Tempos de parada (weav stop)
1	0,8 mm/s	4,5 mm	0,8 Hz	0,3/0,3 s

A calibração do seguimento de junta foi realizada com a peça alinhada, consumindo um trecho da junta, e retornou o valor 0,23 para a variável “ganho”. Após a calibração, o corpo de prova foi inclinado com 10° em relação ao trilho, como apresentado na figura 75.



Figura 75 – Soldagem vertical ascendente com a peça inclinada 10° em relação ao trilho do TARTÍLOPE V2F.

O resultado da soldagem de raiz com seguimento de junta é apresentado na figura 76 e constata o bom funcionamento do TARTÍLOPE V2F para este tipo de soldagem. Além do mais, esse

resultado valida a utilização dos parâmetros empregados, em soldagens de raiz envolvendo esse tipo de peça.

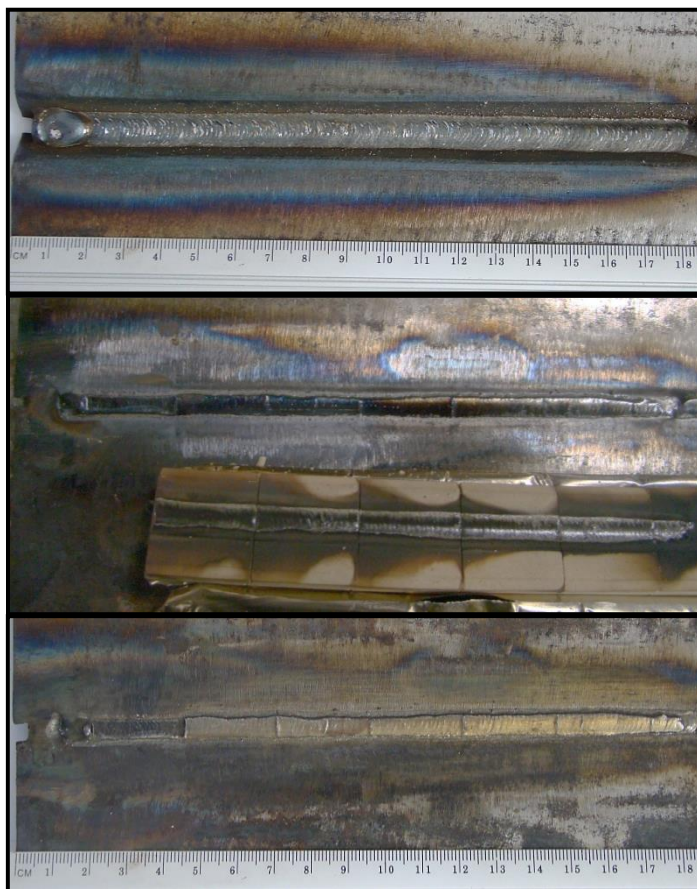


Figura 76 - Resultado da soldagem de raiz com a peça desalinhada 10° em relação ao trilho do TARTÍLOPE.

5 GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA SEGUIDA PELO PONTO MÉDIO DO TECIMENTO

Como mencionado, um dos objetivos deste trabalho envolve a possibilidade de memorização da trajetória seguida pela tocha de soldagem em algum passe e sua posterior utilização por passes seguintes. Essa técnica é normalmente empregada na soldagem do último passe, pois, muitas vezes, como no exemplo da figura 77, a junta não se encontra suficientemente exposta, e, desta forma não é possível a utilização de sensoriamento a arco. Assim, foi desenvolvida uma função para o TARTÍLOPE V2F, que permite a gravação da trajetória seguida pelo ponto médio do tecimento, e outra que modifica a trajetória média seguida pela tocha a partir das informações obtidas no processo de gravação.



Figura 77 - Exemplo de um caso em que é necessária a realização de um último passe, mas não há junta suficientemente exposta que permita o seguimento de junta a arco.

5.1 GRAVAÇÃO DA TRAJETÓRIA

A função desenvolvida de gravação da trajetória seguida pela tocha funciona, basicamente, a partir da segmentação da trajetória e salvamento da distância média deslocada pelo eixo Y em cada segmento. Seu funcionamento está apresentado no algoritmo da figura 78 e se dá da seguinte maneira: primeiramente, em “1” é atribuído o valor 1 para a variável *idc_perc*. Esta variável é utilizada por dois vetores, *perc_x* e *perc_y*, como informação do índice a ser utilizado por eles. Em seguida, são salvos nos vetores *perc_x* e *perc_y* as posições iniciais dos eixos X e Y, respectivamente, e é incrementado o valor de *idc_perc*. Após isto, em “2”, é atribuída a diferença absoluta entre a posição mais recente do eixo X e a última posição salva no vetor *perc_x*, a uma nova variável, denominada *diferença_atual_x*. Na continuação,

em “3”, *diferença_atual_x* é comparada com a constante *dist_perc*, se ela for maior ou igual do que esta última, a variável *idc_perc* é incrementada, se não, não é incrementada. A seguir, em “5”, *diferença_atual_x* é novamente comparada com a constante *dist_perc*, desta vez, se ela for menor ou igual a esta, e *dist_perc* seja menor do que a constante *qtd_perc* (relacionada à capacidade de memorização da trajetória), as variáveis *perc_x* e *perc_y* são atualizadas, em “6”, com a informação da posição atual dos eixos X e Y, do contrário, não são atualizadas. Por final, em “7”, é adicionado o valor mais recente de *idc_perc* ao índice zero do vetor *perc_x*.

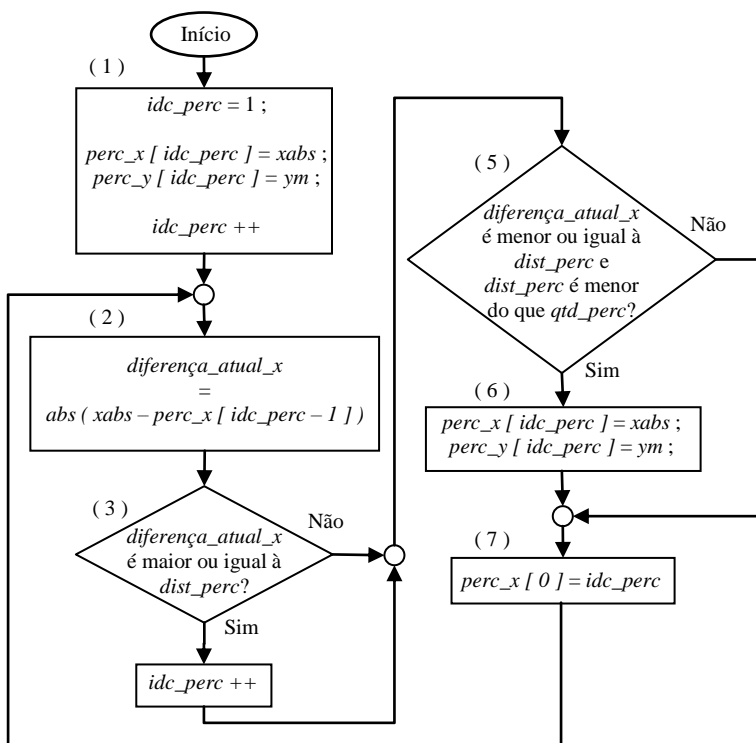


Figura 78 - Fluxograma do funcionamento da função de gravação de trajetória.

5.2 REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA

A função de reprodução de trajetória foi desenvolvida a partir de uma função, já contida no TARTÍLOPE V2F, que permite a soldagem

entre dois pontos predeterminados. Esta função determina a razão entre as distâncias que devem ser percorridas em X e Y, a qual denomina *offset*, e, a partir desta razão, realiza incrementos periódicos no eixo Y em acordo com a inclinação interpretada pelo sistema. A função desenvolvida de reprodução de trajetória funciona definindo continuamente esta razão entre distâncias em acordo a trajetória salva na função de gravação. Seu funcionamento está apresentado no algoritmo da figura 79. De acordo com este, primeiramente, em “1”, é definido o valor 2 para a variável *idc_perc*. Em seguida, em “2”, é estabelecido os pontos iniciais e finais de X e Y para o trecho que será seguido. Na sequência, em “3”, é definida a variável *offset* a partir da razão entre as distâncias que devem ser percorridas em X e Y (*diferença_x* e *diferença_y*) para o trecho corrente. A seguir, em “4”, é realizada uma comparação entre *x_atual* - correspondente a diferença entre a posição atual do eixo X do manipulador e a definida em *ponto_inicial_x* - e a variável *diferença_x*. Se *x_atual* for maior ou igual à *diferença_x* é somado o valor um à variável *idc_perc*, se não for, *idc_perc* não é alterado. Por fim, em “5”, é realizada uma comparação para saber se a soldagem deve ser finalizada ou não.

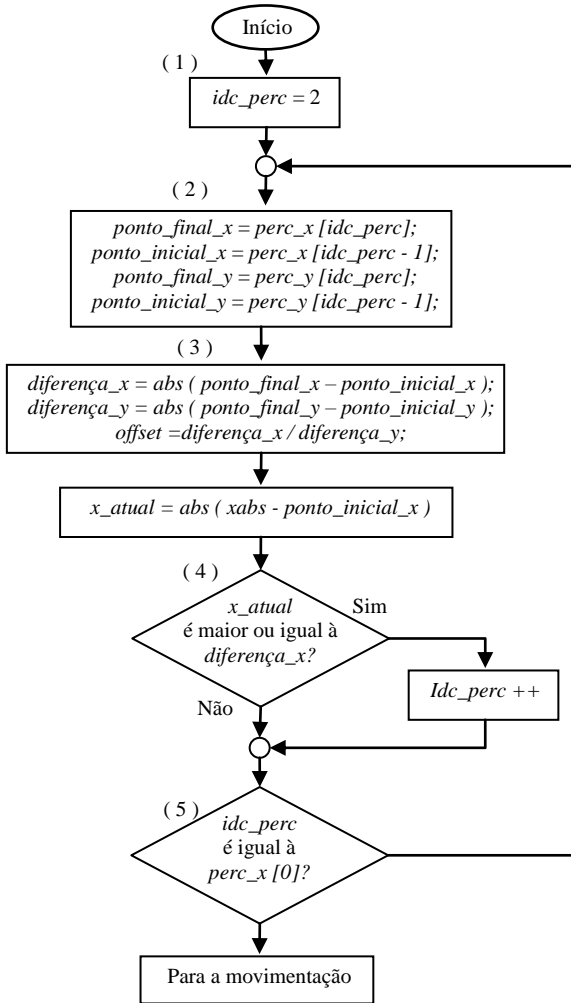


Figura 79 - Fluxograma do funcionamento da função de gravação de trajetória.

5.3 VALIDAÇÃO DAS FUNÇÕES GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO DA TRAJETÓRIA

Foi realizada a soldagem do terceiro e quarto passe daquela realizada no capítulo 4.3.2, com o intuito de validar as funções de gravação e reprodução de trajetória. Os parâmetros de movimentação que foram utilizados estão apresentados na tabela 9. O terceiro passe

dessa soldagem foi realizado utilizando seguimento de junta com o trilho inclinado 15° em relação à peça, a variável “ganho” ajustada em 0,93, e a função de gravação de trajetória habilitada. Seu resultado está apresentado na figura 80 e, de acordo com este, o cordão apresentou um aspecto íntegro por toda sua extensão.

Tabela 9 - Parâmetros de movimentação.

Passe	Velocidade de soldagem	Amplitude do tecimento (<i>Weaving amplitude</i>)	Frequência do tecimento (<i>Weaving frequency</i>)	Tempos de parada (<i>weav stop</i>)
3	0,8 mm/s	14 mm	0,6 Hz	0,3/0,3 s
4	0,7 mm/s	16,5 mm	0,5 Hz	0,25/0,25 s



Figura 80 - Terceiro passe da soldagem com o trilho com ventosas, realizado com a função de gravação ativada.

Uma vez armazenada a trajetória seguida pelo terceiro passe, passou-se para a utilização desta na realização do último passe. Esta soldagem resultou no cordão da figura 81, na qual é possível ser observado que o cordão apresenta-se bem posicionado na junta, validando a aplicabilidade das funções desenvolvidas.

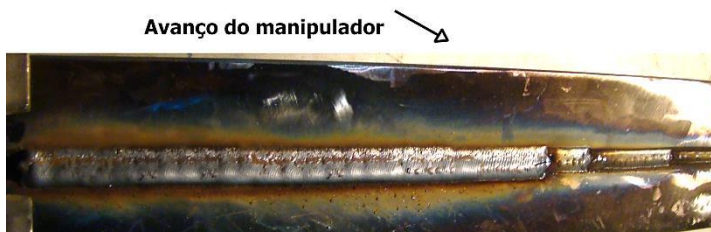


Figura 81 – Soldagem realizada a partir da trajetória traçada pelo terceiro passe por meio da função de reprodução de trajetória.

É possível ser observado na soldagem descrita acima, que o material escorreu para um dos lados. Isto aconteceu porque,

particularmente nestes ensaios com o trilho de ventosa, ao invés de inclinar a peça, era inclinado o trilho. Por esse motivo, a direção do movimento de tecimento ficou inclinada em relação à horizontal, e desta maneira, a gravidade acabou agindo sobre a poça metálica de forma diferente de quando o parâmetro de movimentação foi estabelecido (trilho alinhado e direção do tecimento na horizontal). Ou seja, nestes casos a posição de soldagem passa de vertical para uma mistura de vertical e horizontal, e desta forma, a movimentação definida com o trilho alinhado passa a não corresponder à situação da soldagem. Uma forma de resolver este problema poderia ser a sincronia entre eixos X e Y do manipulador, de modo a reestabelecer a trajetória esperada. Porém, para isto seria necessário uma alta capacidade dinâmica e de resolução do eixo X, uma vez que seria necessário, muitas vezes, o contínuo avanço e retrocesso desse eixo na mesma frequência que o tecimento. Além do mais, seria necessário o estabelecimento de uma nova lógica para a definição da movimentação de cada eixo do TARTÍLOPE V2F, tornando essa opção inviável.

5.3.1 Funcionalidade experimental para ajuste automático de procedimento em função da inclinação entre trilho e força da gravidade

Considerando o exposto acima, foi estabelecida uma função experimental para as soldagens fora de posição, nas quais é necessário o desalinhamento do trilho, complementar à função de reprodução de trajetória. Esta funcionalidade ajusta continuamente o procedimento de soldagem em acordo com o ângulo corrente entre trajetória gravada e trilho, visando reproduzir o cordão resultante da soldagem com o trilho e a peça alinhados.

A função de ajuste automático de procedimento funciona por meio de mudanças nos valores de tempo de parada nas laterais em acordo com a inclinação entre junta (que neste caso é posicionada na vertical) e o trilho (inclinação aleatória). Esta funcionalidade foi estabelecida a partir do emprego da movimentação utilizada na soldagem do quarto passe, apresentada na figura 81, em chapas de aço carbono. Foram realizadas quatro soldagens, cada uma com o trilho inclinado de uma forma em relação à peça (peça na vertical). Em cada um destes ensaios foi mantido o tempo de parada total de 0,5 s, porém, distribuído de maneira diferente entre as laterais direita e esquerda, de modo a apresentar o aspecto desejado (o mesmo que a peça alinhada) em cada cordão. A tabela 10 apresenta as inclinações envolvidas nestas

soldagens e a redistribuição dos tempos de paradas necessária para cada uma.

Tabela 10 – Distribuição dos tempos de parada em função da inclinação da trajetória em relação ao trilho.

Inclinação correspondente	Tempo de parada esquerdo	Tempo de parada direito	$\frac{\text{Tempo de parada esquerdo}}{\text{Tempo de parada direito}}$
0 °	0,25 s	0,25 s	50%
3,3 °	0,33 s	0,17 s	68%
5,7°	0,35 s	0,15 s	80%
8,8°	0,47 s	0,03 s	94%

A partir dos dados obtidos, apresentados na tabela 10, foi realizada a análise de regressão da razão entre tempo de parada esquerdo e direito, e a inclinação. A equação que melhor representou os valores foi linear, com R^2 igual a 0,9975. O gráfico com a linha de tendência resultante dessa regressão, e os respectivos valores está apresentado na figura 82.

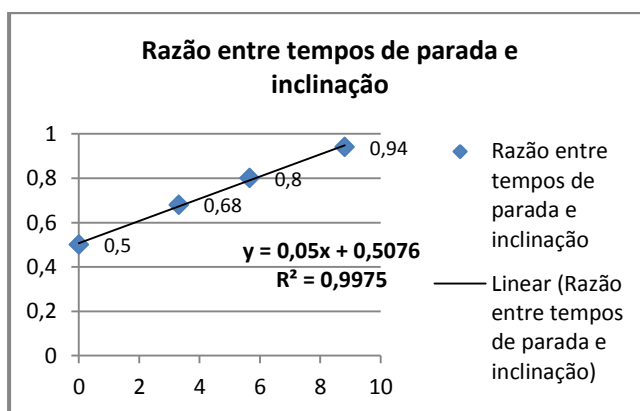


Figura 82 – Linha de tendência das combinações entre desvio padrão das correções e frequência de tecimento.

A equação obtida de relacionamento entre inclinação e distribuição do tempo de parada nas laterais foi adicionada à função de reprodução de trajetória. Neste caso, foi, ainda, limitada a distribuição do tempo de parada total em 100% para algum dos lados e,

consequentemente, de 0% para o outro lado. A partir disso, foi realizada, novamente, a soldagem da peça apresentada na figura 81. Para tanto, foi retirado o último cordão de solda realizado anteriormente, por meio de seu esmerilhamento, e, em seguida, realizada novamente a soldagem do último passe, dessa vez, com a relação entre inclinação e tempos de parada adicionada à função de reprodução. O resultado dessa soldagem, apresentado na figura 83 - na qual foram automaticamente alterados os tempos para 0,5 s e 0 s para a esquerda e direita, respectivamente - mostra que esta implementação melhorou consideravelmente o aspecto do cordão de solda. Desta forma, é validada a estratégia adotada de controle da poça metálica para casos em que o trilho é posicionado de maneira diferente da que foi estabelecida a movimentação da tocha¹⁵.

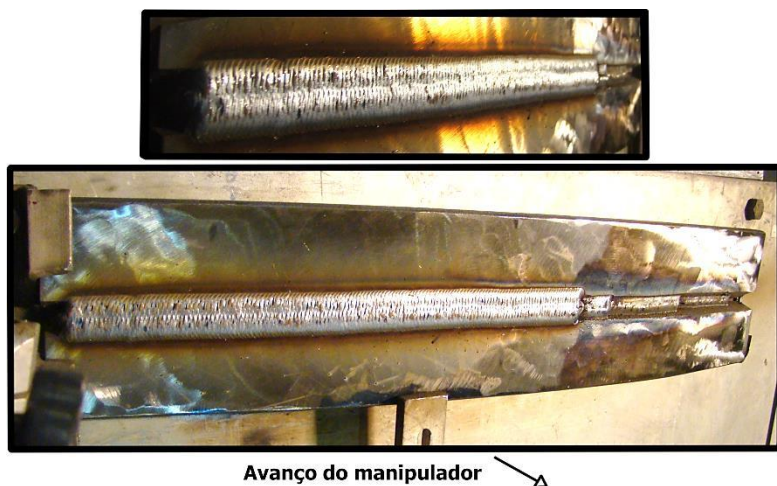


Figura 83 – Soldagem realizada a partir da trajetória traçada pelo terceiro passe com redistribuição automática dos tempos de parada nas laterais.

¹⁵ Neste caso, o programa obteve o valor da inclinação entre trilho e a vertical (uma vez que a junta estava alinhada com a vertical) por meio da função de reprodução. No entanto, esta informação da inclinação poderia ser desvinculada à função de reprodução de trajetória, e vinculada a algum sensor, como, por exemplo, um acelerômetro.

6 CONCLUSÃO

As soldagens verticais utilizando o TARTÍLOPE V2F exigem considerações especiais quando se trata de seguimento de junta com sensoramento a arco. No entanto, estas considerações não se devem a algum fenômeno extraordinário, exclusivo deste tipo de soldagem (como pareceu em certa altura do trabalho), mas basicamente pela movimentação necessária nestas soldagens. Por exemplo, os trabalhos de Costa [13] e Broering [5] contemplaram soldagens na posição plana, mais rápidas do que aquelas abordadas no capítulo 1.1.3. Este fato, isoladamente, já implicaria a necessidade de modificações no cálculo da correção, na utilização do seguimento de junta nas soldagens verticais ascendentes abordadas. Ou seja, para que um sistema de seguimento de junta a arco funcione corretamente, é necessária a consideração para com a movimentação empregada na soldagem.

O trabalho estabeleceu um algoritmo de seguimento de junta, uma calibração e uma funcionalidade de gravação e reprodução de trajetória média da tocha, que tornaram o sistema capaz de realizar diferentes soldagens com eficiência e eficácia. O trabalho abordou também as influências sobre a corrente elétrica na soldagem de juntas. Neste caso, mostrou que a velocidade com que o arame chega à poça de fusão é, no caso de arame de aço de 1,2 mm de diâmetro, a principal influência sobre a corrente, e assim, deve ser considerada no automatismo de seguimento de junta. Mais especificamente, as principais conclusões alcançadas neste trabalho foram:

- Primeiramente, a mudança na velocidade com que o arame chega à poça de fusão (*Vap*), diferentemente do que é afirmado por grande parte da literatura especializada, é o fenômeno que mais gera influências sobre o valor da corrente média durante a soldagem de juntas chanfradas pelo processo MIG/MAG convencional, nas condições abordadas neste trabalho;
- A solução comercial da MOTOMAN foi capaz de realizar a soldagem pretendida. Contudo, foi exigido o estabelecimento de uma grande quantidade de procedimentos para que isso se tornasse possível. Além do mais, suas calibrações são imprecisas e delicadas, uma vez que pequenos desalinhamentos mostraram-se inviabilizadores da calibração;

- Uma modificação no cálculo da correção do seguimento de junta tornou o TARTÍLOPE V2F capaz de realizar a soldagem pretendida inicialmente, com eficiência;
- A velocidade de soldagem e a frequência de tecimento se mostraram como fatores de forte influência ao automatismo do seguimento de junta do TARTÍLOPE V2F. Assim, a partir do equacionamento de uma relação entre essas variáveis e a variável “K”, responsável pelo estabelecimento da correção, foi possibilitada a mudança nesses fatores sem comprometimento do seguimento de junta;
- A relação desalinhamento/ ΔIm é facilmente comprometida a partir de mudanças na configuração da soldagem, como, por exemplo, velocidade com que o arame é alimentado, ângulo do chanfro e amplitude do tecimento. Considerando isto, foi estabelecida uma calibração para o TARTÍLOPE V2F, que se mostrou de fácil realização e apresentou excelentes resultados;
- O erro em regime, intrínseco de controladores do tipo proporcional, mostrou-se como um fator que inviabilizou a soldagem apresentada na página 98, pois não possibilitou a obtenção de um cordão com bom aspecto em nenhuma das regulagens empregadas. A adição da ação integradora foi capaz de extinguir o erro em regime permanente e possibilitou a realização eficaz dessa mesma soldagem, apresentando um cordão com excelente aspecto visual;
- As funções desenvolvidas, de gravação e reprodução da trajetória, foram empregadas em uma soldagem envolvendo uma peça curva e um trilho com ventosas, apresentada na página 113, e mostraram-se eficientes e eficazes. Além do mais, a adição de uma lógica experimental de redistribuição automática dos tempos de parada em função da inclinação entre trajetória reproduzida e o trilho, mostrou-se como uma ótima alternativa para o controle da poça metálica nas situações em que o trilho é posicionado de maneira diferente da que foi definida a movimentação da soldagem.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados alcançados, tem-se como sugestões para trabalho futuros que, por ventura, estejam inseridos dentro do mesmo contexto deste, os seguintes itens:

- **Estudo da utilização do seguimento de junta nos processos STT e CMT** – Essas variantes do processo MIG/MAG também apresentam variações na corrente média durante a soldagem de juntas com tecimento, devido à variação da taxa de curto circuito. Assim, ao contrário do que alguns especialistas sugerem, com relação à seguimento de junta com processos controlados por corrente, também é possível utilizar seguimento de junta a arco com esses processos.
- **Estudo da possibilidade de controle da amplitude do tecimento e velocidade de soldagem a partir do desvio padrão das correções ou dos erros** – Neste trabalho foi constatada a influência da mudança da amplitude do tecimento sobre o desvio padrão das correções. Desta forma, a mudança na distância entre as chapas que formam a junta deve, provavelmente, influenciar o desvio padrão de maneira similar a da amplitude. A velocidade de soldagem, por sua vez, influencia a exposição do arco à junta. Assim, quanto mais rápido for o avanço da soldagem, mais direto será o contato entre o arco e a peça, consequentemente, as variações elétricas se darão mais bruscamente e, desta maneira, maior deve ser o desvio padrão das correções. Ou seja, talvez seja possível corrigir automaticamente a amplitude do tecimento no decorrer da soldagem, assim como, a velocidade de soldagem, ambos em função do desvio padrão das correções;
- **Estudo de desenvolvimento de uma estratégia de redução da velocidade de soldagem e aumento da amplitude do tecimento em acordo com a inclinação entre a trajetória média seguida pela tocha e o trilho** – Quanto maior é essa inclinação, maior é a velocidade de avanço da tocha em relação à junta, e maior torna-se a distância entre as peças, em relação ao tecimento.

Poderiam ser estudadas as melhorias que o reajuste automático dessas variáveis poderia vir a possibilitar;

- **Desenvolvimento de um sistema de controle da DBCP que opere simultaneamente com o seguimento de junta** - Para tanto, a corrente pode ser filtrada digitalmente com fator de amortecimento e ordem altos. Além do mais, as correções de DBCP poderiam ser realizadas em intervalos maiores do que o seguimento de junta, de modo a não comprometê-lo;
- **Substituição do filtro RC do TARTÍLOPE pela filtragem do sinal de corrente de forma totalmente digital** – O TARTÍLOPE V2F filtra o sinal de corrente por meio de um filtro de primeira ordem, RC. Esta filtragem poderia, no entanto, dar-se de maneira totalmente digital, uma vez que a taxa de aquisição de sinal, por parte do TARTÍLOPE, é relativamente alta (2kHz), podendo ser ampliada. Esta filtragem poderia ser realizada, inclusive, a partir da equação 7, de amortecimento exponencial, em cascata, facilitando a obtenção de filtros de maior ordem. Neste caso, ainda, poderiam ser definidos os valores ideais de α para soldagem com diferentes frequências de tecimento e, a partir desses valores, ser obtida uma equação de relacionamento entre frequência de tecimento e α . Com isto, seria possível adequar a filtragem a cada frequência de tecimento envolvida na soldagem e, desta forma, aumentar a precisão e eficácia do sistema;
- **Compensar o atraso da filtragem** – Uma vez que fosse desenvolvida uma função de compensação do atraso da filtragem, seria possível utilizar filtros de ordem elevada, e seria possibilitado o aumento da precisão do sistema;
- **Substituição da unidade dos tempos de paradas** – A regulação dos tempos de parada (atualmente em segundos) poderia ser substituída por uma relação entre tempo em movimento e tempo em parada (em porcentagem), e uma relação entre tempo de parada esquerdo e direito (também em porcentagem). Assim, seria facilitada a mudança na frequência de tecimento sem comprometimento da soldagem;

- **Regulagem automática da relação entre tempo de parada esquerdo e direito, em função da inclinação informada por um acelerômetro** – Como foi abordado no capítulo 5.3.1, o programa modificou a relação entre tempos de parada a partir da inclinação entre trilho e a vertical (uma vez que a junta estava posicionada na vertical). No entanto, esta informação da inclinação poderia ser desvinculada à função de reprodução de trajetória, e vinculada a um acelerômetro acoplado ao manipulador. Desta forma, o manipulador corrigiria a movimentação da soldagem, de modo a revalidar o procedimento em acordo com mudanças na posição da soldagem.

REFERÊNCIAS

1. MARINE TALK. MarineTalk. **7 Korean Shipbuilders Rank in Top 10**. Disponível em: <<http://marinetalk.com/articles-marine-companies/art/7-Korean-Shipbuilders-Rank-in-Top-10-xxx000123742OT.html>>. Acesso em: 13 setembro 2012.
2. OKUMURA, T.; TANIGUSHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações. A Soldagem na Construção Naval**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos, 1982.
3. GULLCO. Gullco international limited. **Product Applications - Shipbuilding Building**, 2010. Disponível em: <<http://www.gullco.com/govan-shipbuilding.html>>. Acesso em: 15 agosto 2012.
4. CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 136. 2009.
5. BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automatização da Soldagem e do Corte Térmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 96. 2005.
6. AMANTE, D. D. A. M. **Imperfeições de fabricação na construção naval e offshore**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 87. 2006.
7. ANDERSEN, L. F. **Residual Stresses and Deformations in Steel Structures**. Technical University of Denmark. Lyngby. 2000.
8. LUCAS, R. P. **Sistema de geração de trajetórias em manipulador cartesiano para aplicações em soldagem naval**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 113. 2011.
9. FEDELE, R. A. Soldagem na Indústria Naval Moderna: Materiais e Processos. **Revista Soldagem e Inspeção**, Ano 6, n. 9, 2000.
10. SHIPWELD. **Automatic Welding Process for the Shipbuilding Industry**. Disponível em: <<http://www.shipweld.org/>>. Acesso em: 13 set. 2012.
11. INROTECH. **Innovative Robotic Technologies**. Disponível em: <<http://www.inrotech.com/>>. Acesso em: 13 set. 2012.
12. ESTADÃO.COM.BR. Economia e negócios. **Indústria naval tem de atender a demanda, diz ministro**, 2012. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia%20geral,industria-naval-tem-de-atender-a-demanda-diz-ministro,134447,0.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2013.

13. COSTA, A. R. F. **Desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta que utiliza o próprio arco como sensor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 120. 2003.
14. ESAB. **Railtrac 1000 - A unique, flexible, multi-purpose system for welding and cutting**, Göteborg, Suécia.
15. COOK, G. E. Through-the-arc sensing for arc welding. **10th NSF Conference on Production Research and Technology**., fevereiro-março 1983. 141-151.
16. COOK, G. E. Robotic arc welding: Research in sensory feedback control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 30, agosto 1983. 252-268.
17. JILUAN, P. **Arc Welding Control**. Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 2003.
18. DUTRA, J. C.; ROSA, V. M. XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem - ENTS. **O Arco Elétrico como Sensor de Procura de Junta**, Caxias do Sul, junho 1995.
19. EBAH. **Apostila de soldagem com eletrodo revestido**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/apostilasobre-eletrodo-revestido-pdf-a14059.html>>. Acesso em: 15 set. 2012.
20. EKELÖF, B. et al. **Method for Automatic Multi-Layer Welding**. 6.155.475, 5 dezembro 2000.
21. MURAKAMI, T. et al. **Method of Multi-Layer Welding**. 4.508.953, 2 abril 1985.
22. MOTOMAN. **Motoman NX100 Multi-Layer Welding Function Manual (P/N 152605-1)**, West Carrollton, EUA, 2006.
23. LINDÉN, G. COMMISSIONS XII Arc Welding Processes and Production Systems. **Sensors for seam tracking and adaptive control**, IIW/IIS, Doc. n. XII-1077-89, 1988.
24. CARY, H. **Arc Welding Automation**. 1. ed. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc, 1995. 527 p.
25. NORRISH, J. **Advanced Welding Process**. Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 1992. 301 p.
26. ZHANG, S. B. et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering. **Noncontact Ultrasonic Sensing for Seam Tracking in Arc Welding Processes**, EUA, v. 120, n. 8, agosto 1998. p. 600-608.
27. NELSO GAUZE BONACORSO, J. C. D. M. H. H. D. E. Desenvolvimento de uma Célula de Fabricação Automatizada para Soldagem GMAW dos Componentes Estruturais das Rodas Metálicas de Tratores Agrícolas. **Consolda 2011**, Natal, 2011. 9.
28. GOHR, R. J. **Novos Métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina.

- Florianópolis, p. 138. 2002.
29. MOTOMAN. **ComArc Function Instruction Manual (P/N 144075-1)**, West Carrollton, EUA, 31 dezembro 2000.
 30. SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 113. 2005.
 31. DUTRA, J. C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle das Variáveis na Soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 151. 1989.
 32. MOTOMAN, Y. About Yaskawa Motoman. **Yaskawa Motoman Robotics**, 2012. Disponível em: <<http://www.motoman.com/about/default.php>>. Acesso em: 15 nov. 2012.
 33. BROWN, R. G. **Exponential Smoothing for Predicting Demand**. Arthur D. Little Inc. Cambridge, p. 15. 1956.
 34. WIKIPÉDIA. **Valor eficaz**, 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Valor_eficaz>. Acesso em: 22 fev. 2013.
 35. SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.